高等职业教育精品工程规划教材·电子信息类
工业和信息产业职业教育教学指导委员会“十二五”规划教材
电类专业通用

电工电路分析与测试

张明金　主　编
范爱华　肖亚杰　王成琪　副主编
赵成民　主　审

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书根据高职高专培养人才的特点及培养目标，并考虑到目前多数高职高专院校采用项目化、理实一体化、任务驱动等教学方法的改革，以工作任务引领的方式将相关知识点融入完成工作任务所必需的工作项目中，使学生掌握必要的基本理论知识，并使学生的实践能力、职业技能、分析问题和解决问题的能力不断提高。

本书共 6 个项目：直流电路的分析与测试、正弦交流电路的分析与测试、线性电路的过渡过程分析与测试、非正弦周期电流电路的分析与测试、变压器的认识与使用、交流电动机的认知及电气控制线路的装配。

本书总学时为 60~70 学时。对于电气自动化技术、机电一体化技术专业，由于后续开设《电机与电气控制技术》课程，所以可以选学项目 1 到项目 4 及项目 5 的任务 1 等内容；对其他电类专业可根据专业人才培养方案中的课程设置情况选取适合的相关教学内容。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校的电类专业教材，也可供工程技术人员参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

电工电路分析与测试/张明金主编. —北京：电子工业出版社，2012.7
高等职业教育精品工程规划教材. 电子信息类
ISBN 978-7-121-17363-9

Ⅰ. ①电… Ⅱ. ①张… Ⅲ. ①电路分析—高等职业教育—教材②电路测试—高等职业教育—教材
Ⅳ. ①TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 125197 号

责任编辑：郭乃明
印　　刷：
装　　订：
出版发行：电子工业出版社
　　北京市海淀区万寿路 173 信箱　邮编　100036
开　　本：787×1 092　1/16　印张：15.5　字数：381 千字
印　　次：2012 年 7 月第 1 次印刷
印　　数：3 000 册　　定价：29.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

前　言

本书是根据高职高专人才培养的目标，并考虑到目前多数高职高专院校进行项目化、理实一体化、任务驱动等教学方法的改革，以“工学结合、项目引导、‘做中学，学中做，学做一体，边学边做’一体化”为原则编写的。以工作任务引领的方式将相关知识点融入到完成工作任务所必备的工作项目中，使学生掌握必要的基本理论知识，并使学生的实践能力、职业技能、分析问题和解决问题的能力不断提高。

本书是编者将多年的高职高专的教育教学经验，积累和收集的资料整理汇编，在电子工业出版社的组织和大力支持下，编写而成的。

本书在编写的过程中，本着“精选内容，打好基础，培养能力”的精神，力求讲清基本概念，精选有助于建立概念、掌握方法、联系实际应用的例题和习题。各项目分成若干个任务，各任务以任务内容、任务目标、任务实施（包含：现象观察或知识先导、知识链接、应用举例、实践操作、问题研讨）为主线而编写，每个项目附有项目小结和习题。

本书由徐州工业职业技术学院张明金担任主编，负责制定了编写大纲。扬州工业职业技术学院范爱华、徐州工业职业技术学院肖亚杰、徐州经贸高等职业学校王成琪担任副主编。其中项目 1、2 由张明金老师编写，项目 3、4 由肖亚杰老师编写，项目 5 由王成琪老师编写，项目 6 由范爱华老师编写。全书由张明金老师统稿。

本书由徐工轮胎集团有限公司赵成民高级工程师担任主审，他对本书的书稿进行了认真仔细地审阅，提出了许多宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

本书编写过程中，得到了编者所在学校的各级领导及同事们的大力支持与帮助，在此表示感谢。同时对书后所列参考文献的各位作者表示深深的谢意。

由于“项目式”课程是一种全新的教学形式，多数高职高专院校都处于不断实践、完善的过程中，加之编者水平所限，书中不妥之处在所难免，在取材新颖和实用性等方面定有不足，敬请各位读者提出宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

编　者

2012 年 4 月

目　　录

项目 1　直流电路分析与测试……（1）

任务 1.1　电路基本知识及直流电压、电流的测试……（2）

1.1.1　电路和电路模型……（2）

1.1.2　电路中的物理量及其测试……（4）

1.1.3　电路的三种工作状态……（10）

1.1.4　基尔霍夫定律及应用……（12）

任务 1.2　电路的基本元件及其检测……（15）

1.2.1　电阻元件及其检测……（15）

1.2.2　电容元件及其检测……（26）

1.2.3　电感元件及检测……（31）

1.2.4　电源元件……（34）

任务 1.3　复杂直流电路的分析与测试……（38）

1.3.1　支路电流法及应用……（39）

1.3.2　节点电压法及应用……（42）

1.3.3　叠加原理及应用……（45）

1.3.4　戴维南定理及应用……（48）

项目小结……（51）

习题……（52）

项目 2　正弦交流电路的分析与测试……（58）

任务 2.1　正弦交流电路的认识与测试……（59）

2.1.1　正交流电的基本知识及交流信号的测试……（59）

2.1.2　正弦交流的相量表示及测试……（64）

任务 2.2　单一参数正弦交流电路的分析与测试……（68）

2.2.1　纯电阻正弦交流电路的分析与测试……（68）

2.2.2　纯电感正弦交流电路的分析与测试……（71）

2.2.3　纯电容正弦交流电路的分析与测试……（73）

任务 2.3　多参数组合的正弦交流电路的分析与测试……（76）

2.3.1　RLC 串联正弦交流电路的分析与测试……（76）

2.3.2　感性负载与电容器并联电路的分析与测试……（85）

任务 2.4　三相正弦交流电路的分析与测试……（94）

2.4.1　三相电源的连接及测试……（94）

2.4.2　三相负载的连接……（97）

任务 2.5　安全用电与节约用电常识 …… （107）
2.5.1　安全用电常识 …… （107）
2.5.2　节约用电常识 …… （115）
项目小结 …… （118）
习题 …… （119）

项目 3　线性电路过渡过程分析与测试 …… （124）

任务 3.1　线性电路过渡过程的认识与测试 …… （124）
3.1.1　过渡过程的概念 …… （126）
3.1.2　换路定律 …… （126）
3.1.3　初始值的计算 …… （127）
任务 3.2　一阶线性电路过渡过程的分析与测试 …… （129）
3.2.1　一阶电路的零状态响应 …… （130）
3.2.2　一阶电路的零输入响应 …… （134）
3.2.3　一阶电路的全响应 …… （137）
项目小结 …… （141）
习题 …… （142）

项目 4　非正弦周期电流电路的分析与测试 …… （145）

任务 4.1　非正弦周期电流电路的认识与测试 …… （145）
4.1.1　非正弦周期电量的产生及分解 …… （146）
4.1.2　非正弦周期电流电路中的有效值、平均值和功率 …… （149）
任务 4.2　非正弦周期电流电路的分析计算与测试 …… （153）
项目小结 …… （158）
习题 …… （159）

项目 5　变压器的认识与使用 …… （161）

任务 5.1　磁路的认识与测试 …… （162）
5.1.1　磁路的基本知识 …… （162）
5.1.2　互感与互感电压 …… （169）
5.1.3　绕组的同极性端及测定 …… （171）
5.1.4　互感线圈连接 …… （172）
任务 5.2　变压器的认知与测试 …… （175）
5.2.1　单相变压器的认知 …… （176）
5.2.2　三相变压器的认知 …… （181）
5.2.3　其他用途变压器的认知 …… （182）
任务 5.3　变压器的常见故障及检修方法 …… （186）
5.3.1　变压器的常见故障及检修方法 …… （186）
5.3.2　变压器的正确使用 …… （188）
5.3.3　变压器的维护与检查 …… （189）

项目小结 ……（190）
习题 ……（191）
项目 6　交流电动机的认知及电气控制线路的装配 ……（193）
任务 6.1　三相异步电动机的工作原理及特性 ……（194）
6.1.1　三相异步电动机的结构 ……（195）
6.1.2　三相异步电动机的运转原理及额定值 ……（197）
6.1.3　三相异步电动机的电磁转矩和机械特性 ……（201）
任务 6.2　三相异步电动机的使用与测试 ……（205）
6.2.1　三相异步电动机的启动与反转 ……（205）
6.2.2　三相异步电动机的调速 ……（209）
6.2.3　三相异步电动机的制动 ……（210）
任务 6.3　三相异步电动机基本控制线路的分析与装配 ……（213）
6.3.1　常用低压电器的认识 ……（214）
6.3.2　三相异步电动机单向直接启动控制线路的分析与装配 ……（220）
6.3.3　三相异步电动机正、反转控制线路的分析与装配 ……（224）
6.3.4　三相异步电动机 Y-△换接降压启动控制线路的分析与装配 ……（227）
任务 6.4　单相异步电动机的认知与使用 ……（228）
6.4.1　单相异步电动机的工作原理 ……（229）
6.4.2　单相异步电动机的启动和反转 ……（229）
6.4.3　单相异步电动机的调速 ……（232）
项目小结 ……（234）
习题 ……（235）
参考文献 ……（238）

项目 1　直流电路分析与测试



项目内容

1. 电路基本知识及直流电压、电流的测试；
2. 基尔霍夫定律及其验证；
3. 电路基本元件及其检测；
4. 电路分析方法及其运用；
5. 电路定理及其运用。



知识目标

1. 了解电路的组成与作用，电路模型的概念。

2. 正确理解电路中的物理量的意义，电流、电压的正方向和参考正方向的概念及电位的概念；掌握电路中电位、电功率的计算。

3. 掌握独立电源、电阻、电感、电容元件的伏安关系，了解受控源的概念。

4. 熟练掌握电阻串联、并联、混联电路的等效变换。

5. 熟练掌握基尔霍夫定律及用支路电流法求解电路，初步理解并会应用电源等效变换、电阻的“星形—三角形”等效变换法、节点电压法、叠加原理、戴维南定理求解复杂电路。



能力目标

1. 具有初步的电路图的识读能力及按电路原理图接线的能力；
2. 会正确使用直流电压表、电流表及万用表进行直流电压、电流测量；
3. 会识别、测试电阻、电感、电容等元件；
4. 会用万用表进行直流电路故障的检测。



情感目标

1. 熟悉实验室规则及安全操作知识，加强学生思想品德教育，逐步培养学生良好习惯与职业道德，树立正确的价值观；

2. 加强学生逻辑思维能力的培养，加强学生理论联系实际的意识，逐步培养学生分析问题的能力及主动动手的学习习惯；

3. 锻炼信息、资料搜集与查找的能力。

任务 1.1　电路基本知识及直流电压、电流的测试

任务描述

在人们的生活、生产实践及其他各类活动中，已普遍地使用电能，可以说人们已离不开电能的使用，电路是传输或转换电能不可缺少的“载体”。研究电路和学会分析电路是用电的最基本要求，也是为以后课程学习打下基础的基本要求。本任务学习电路的组成及作用、理想电路元件及电路模型，电路中的物理量，电路的三种工作状态，基尔霍夫定律，简单直流电路的连接与测试。

任务目标

了解电路的组成，电路模型的概念，理解电路中的物理量的意义，电流、电压的正方向和参考正方向的概念；掌握电路中电位、电功率的计算方法；掌握电路三种工作状态的特征；掌握基尔霍夫定律及运用；学会安装简单直流电路；学会使用稳压电源、直流电压表和电流表。

任务实施

1.1.1　电路和电路模型

知识先导 —— 认一认

观察手电筒电路的连接及组成，电路如图 1-1 所示。

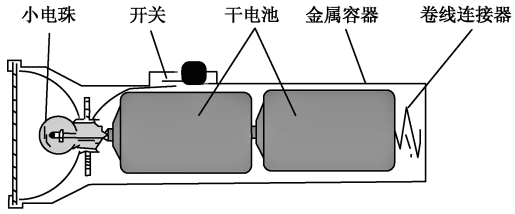


图 1-1　手电筒电路

知识链接 —— 学一学

1. 电路

电路是电流流通的路径，是为实现一定的目的将各种元器件（或电气设备）按一定方式

连接起来的整体。电路一般由电源、负载及中间环节组成。

（1）电源

电源是产生电能和电信号的装置，如各种发电机、蓄电池、传感器、稳压电源、信号源等。

（2）负载

负载是取用电能并将其转换为其他形式能量的装置，如电灯、电动机、扬声器等。

（3）中间环节

中间环节是传输、分配和控制电能或信号的部分，如连接导线、控制电器、保护电器、放大器等。

电路的组成不同，其功能也就不同，电路的一种作用是实现电能的产生、传输、分配和转换，各类电力系统就是典型实例。图 1-2（a）所示是一种简单的实际电路，它由干电池、开关、灯泡和连接导线等组成。当开关闭合时，电路中有电流流通，灯泡发光，干电池向电路提供电能；灯泡是耗能元件，它把电能转化为热能和光能；开关和连接导线的作用是把干电池和灯泡连接起来，构成电流通路。

电路的另一种作用是实现信号的传递和处理，如电话线路、有线电视电路和网络，传递着人们需要的信息。收音机、电视机、计算机的内部电路起着接收和处理信号的重要作用。如图 1-2（b）所示，话筒将语音信号转换为电信号，经放大器进行放大处理传递给扬声器，以驱动扬声器发音。

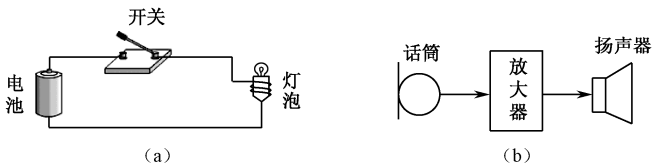


图 1-2　电路示意图

2. 理想电路元件及电路模型

组成实际电路的元件种类繁多，但实际的电路元件在电路中所表现的电磁性质可以归纳为几类，而每一个元件所反映的电磁性质又以某一特定项为主，其他性质在一定条件下可以忽略，这样就可以把实际的电路元件理想化，将电路实体中的各种电气设备和元器件用一些能够表征它们主要电磁特性的元件模型来代替，而对它的实际上的结构、材料、形状等非电磁特性不予考虑。即用一个假定的二端元件来代替实际元件，二端元件的电和磁性质反映了实际电路元件的电和磁的性质，这个假定的二端理想电路元件，简称为电路元件，如电阻、电感、电容、电源等。

电阻：表示消耗电能的元件，如电阻器、灯泡、电炉等。可以用理想电阻来反映其在电路中消耗电能这一主要特征。

电感：表示产生磁场、储存磁场能量的器件，如各种电感线圈。可以用理想电感来反映其储存磁能的特征。

电容：表示产生电场、储存电场能量的器件，如各种电容器。可以用理想电容来反映其储存电能的特征。

电源：电源有两种表示方式，即电压源和电流源。表示能将其他形式的能量转换为电能

的元件。

理想电路元件特征：一是只有两个端子；二是可用电压或电流按数学方式描述；三是不能分解为其他元件。

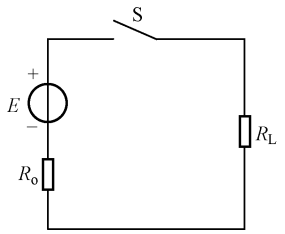


图 1-3　电路模型

实际电路是由一些电工设备、器件和电路元件所组成的。为了便于分析和计算，把实际元件和器件理想化并用国家统一的标准符号来表示，构成电路模型。即由理想电路元件组成的电路称为电路模型，也就是人们常说的电路图，如图 1-3 所示。

将实际的元件用基本电路符号代替，是一个将事物抽象成理想模型的过程。基本电路元件是抽象了的理想元件，如电阻、电容、电感等。但实际的元件在电路中发生的作用是复杂的，如日光灯电路，不能简单地把日光灯整套设备用电阻代替，日光灯的辅助器件——镇流器，不仅具有电感的性质，还具有电阻和电容的性质。但由于镇流器的电阻很小，电容所起作用也很小，所以在一般情况下可以忽略次要因素，突出其主要作用，即将镇流器用理想元件电感来表示，再和表示日光灯管灯丝的电阻串联，但在分析要求较高的情况下，又要将镇流器用电感、电阻和电容三种元件相组合来代替。

本书所分析的电路，就是这种电路模型。在电路图中，各种电路元件用规定的图形符号表示。

需要注意的是，具有相同的主要电磁性能的实际电路部件，在一定条件下可用同一电路模型表示；同一实际电路部件在不同的应用条件下，其电路模型可以有不同的形式。不同的实际器件只要有相同的主要电气特性，在一定的条件下可用相同的模型表示，如灯泡、电炉等在低频电路中都可用理想电阻表示。



实践操作 —— 做一做

图 1-4 所示为两个双联开关控制一盏灯电路的原理示意图，请在实验线路板上根据图示原理，利用直流电源、连接导线、双向开关及小灯泡模拟实现两地控制一盏灯电路。

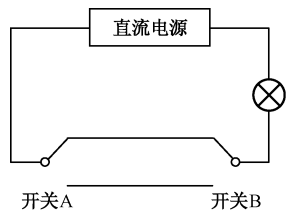


图 1-4　两地控制一盏灯原理示意图

1.1.2　电路中的物理量及其测试



知识链接 —— 学一学

1. 电流

电荷有规律的定向移动形成电流。金属导体中的自由电子带负电荷，在电场力的作用下，自由电子逆着电场方向定向运动就形成电流；同样，电解液中的正离子带正电荷，在电场力的作用下，正离子沿着电场方向定向移动也形成电流。

电流的强弱用电流强度来表示，简称为电流，“电流”一词不仅可以表示电流的概念，也用来表示电流的大小。电流的数值等于单位时间内通过导体横截面的电荷量。设在极短时间

dt 内，通过导体截面的电荷量为 dq，则电流为：

$$i=\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} \tag{1.1}$$

如果电流的大小和方向都不随时间变化，这样的电流称稳恒直流电流，用大写字母 I 表示，则此时电流为：

$$I=\frac{Q}{t} \tag{1.2}$$

电流的大小与方向随时间变化，这样的电流称为交流电流，用 i 表示。

在国际单位制（SI）中，电流的单位是安培（A），电荷的单位是库仑（C），时间的单位是秒（s），即

$$1\mathrm{A}=1\mathrm{C/s}$$

在实际使用中，电流还经常用到较小的单位，如毫安（mA）、微安（μA）。

注意：直流电常用字母“DC”表示；交流电常用字母“AC”表示。

人们习惯上规定正电荷定向移动的方向为电流的正方向。

2. 电压

电压是反映电场能性质的物理量。电压的大小用电场力移动单位正电荷做功来定义，电场力将单位正电荷从一点移动到另一点所做的功越多，这两点间的电压就越大。

在电路中，电场力将单位正电荷从 a 点移动到 b 点所作的功称为 a、b 两点间的电压，直流电压用大写字母 U 表示，a、b 两点间的电压表示为 U_{ab}：

$$U_{ab}=\frac{W_{ab}}{Q} \tag{1.3}$$

式中，U_{ab} 为 a、b 两点间的电压。

W_{ab} 为电场力将电荷 Q 从 a 点移动到 b 点所做的功。当 $W_{ab}>0$ 时，表示电场力做正功，若移动的电荷为正电荷，即 $Q>0$，则 $U_{ab}>0$。反之，W_{ab} 和 Q 不同符号时，$U_{ab}<0$。

在实际应用中，电压的单位除伏特（V）以外，还常用到千伏（kV）、毫伏（mV）、微伏（μV）等单位。

电压的实际方向规定为正电荷所受电场力的方向。

需要强调的是，电压是对电路中两点而言的，习惯中所说某点或某导体上的电压，实际为该点的电位（物理中所学习的电势）——该点与零电位（电势）参考点之间的电压。

通常用带双下标的字母表示某两点的电压，如 U_{ab} 表示 a、b 两点间电压。可以证明：$U_{ab}=-U_{ba}$。

3. 电位

在电气设备的调试和维修中，常要测量各点的电位，在分析电子电路时，通常要用电位的概念来讨论问题。电场中某一点的单位正电荷所具有的电位能，称为该点的电位。电位用字母 V 表示，如 a 点的电位表示为 V_a。

在电路中选一参考点，则其他点的电位就是由该点到参考点的电压。即，如果参考点为 o，则 a 点的电位为：

$$V_a=U_{ao} \tag{1.4}$$

电位的单位与电压的单位相同，为伏特（V）。

参考点的电位规定为 0V，所以，又叫零电位点。其他各点的电位，比参考点电位高的电位为正，比参考点电位低的为负。参考点在电路中通常用符号“⊥”表示。

在工程中常选大地作为电位参考点；在电子线路中，常选一条特定的公共点或机壳作为电位参考点。

要测量电路中某点的电位，只需用电压表测量某点到零电位参考点的电压。而计算电路中某点电位的方法是：首先确认电位参考点的位置；然后从被求点开始通过一定的路径绕到电位参考点，则该点的电位等于此路径上所有电压降的代数和。

4. 电动势

电源是将其他形式的能转化为电能的装置。例如，干电池将化学能转化为电能，具体地说，它是利用化学反应的力量将正电荷移动到电源正极、负电荷移动到电源负极，使电荷的电势能增加，从而使电源两端产生电压。

电源将其他形式的能转化为电能的能力越强，移动单位电荷时所作的功就越大，电源提供的电压也就越大。电动势是表征电源提供电能能力大小的物理量，电动势在数值上等于电源未接入电路时两端的电压。

电源把单位正电荷从电源“－”极搬运到“＋”极，外力（非静电力）克服电场力所做的功，称为电源的电动势，用符号 E 表示。如果被移送的电荷量表示为 Q，外力（非静电力）克服电场力所作的功为 $W_{外}$，则电动势 E 为：

$$E=\frac{W_{外}}{Q} \tag{1.5}$$

电动势的单位和电压的单位相同，为伏特（V）。电动势的方向规定为从电源的负极经过电源内部指向电源的正极，即与电源两端电压的方向相反。

5. 电流、电压的参考方向

（1）电流、电压的参考方向

在电路的分析计算中，流过某一段电路或某一元件的电流实际方向或两端电压的实际方向往往很难确定，为了进行分析和计算电路，需要先引入电压的参考方向以及电流的参考方向概念，即先假设电流的方向和电压的方向。

为了分析计算电路，人为地指定的电压、电流方向，称为电压、电流的参考方向。

对于电路的某个电流、某两点的电压而言，它们的实际方向只有两种可能，当任意指定了一个参考方向后，实际方向要么与参考方向一致，要么与参考方向相反，实际方向与参考方向一致时，取正值；实际方向与参考方向相反时，取负值，如图 1-5（a）、（b）所示，它反映电流的实际方向与参考方向的关系。



（a）$I>0$　　（b）$I<0$

图 1-5　电流实际方向与参考方向的关系

关于电流和电压的参考方向，要注意以下两点：

① 电流、电压的参考方向可以任意选定。但一经选定，在电路分析计算过程中不能改变。

② 分析电路时，一般要先标出参考方向再进行计算，在电路中，所有标注的电流、电压方向均可认为是电流、电压的参考方向，而不是指实际方向。实际方向由计算结果确定。若计算结果为正，则实际方向与参考方向一致；若计算结果为负，则实际方向与参考方向相反。

（2）电流、电压的关联参考方向

电流和电压参考方向可以任意选取，因此电流和电压参考方向可以选取为一致，也可以选取为相反方向，如图 1-6 所示。

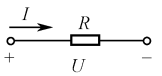
当电流和电压的参考方向一致时，称为关联参考方向，如图 1-6（a）所示。

在电流和电压选取关联参考方向时，功率为：

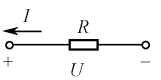
$$P=UI \tag{1.6}$$

$P=UI>0$，元件吸收功率；$P=UI<0$，元件发出功率。

当电压和电流参考方向相反时，称为非关联参考方向，如图 1-6（b）所示。



（a）电压方向与电流方向一致



（b）电压方向与电流方向相反

图 1-6　电流和电压参考方向的选择

在电流和电压选取非关联参考方向时，功率为

$$P=-UI \tag{1.7}$$

$P=-UI>0$，元件吸收功率；$P=-UI<0$，元件发出功率。

需要指出的是，一般在分析计算电路时，电流、电压都采取关联参考方向。

6. 电功率和电能

电功率是电路分析中常用到的一个物理量。传递转换电能的速率称为电功率，简称功率，用 p 或 P 表示。习惯上，都把发出或吸收电能说成发出或吸收功率。功率表示为：

$$p=\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}t} \tag{1.8}$$

在 SI 中，功率的单位为瓦（特）（W），在实际应用中，还常用到千瓦（特）（kW），兆瓦（特）（MW）、毫瓦（特）（mW）等单位。

对图 1-7 所示的电路，电阻两端的电压是 U，流过的电流是 I，电压与电流的方向一致，则电阻吸收的功率为

$$P=UI \tag{1.9}$$

$P=UI>0$，元件吸收功率。

$P=UI<0$，元件发出功率。

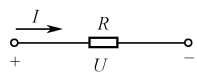


图 1-7　电路示意图

电阻在 t 时间内所消耗的电能 W 为：

$$W=Pt \tag{1.10}$$

电能的 SI 单位是焦（耳）（J），它等于功率为 1 瓦的用电设备在 1 秒内所消耗的电能。在实际生活中还采用千瓦小时（kW • h）作为电能的单位，它等于功率为 1 千瓦的用电设备在 1

小时（3600 秒）内所消耗的电能，即通常所说的 1 度电。1 度=1kW·h=10^3×3600=3.6×10^6（J）

应用举例 —— 练一练

例 1.1　如图 1-8 所示电路，已知 E_1=140V，E_2=90V，R_1=20Ω，R_2=5Ω，R_3=6Ω，I_1=4A，I_2=6A，I_3=10A，试求分别以 A 点、B 点为电位参考点时，各点的电位 V_A、V_B、V_C、V_D 及电压 U_{CD}。

解　以 A 点为电位参考点时有：

V_A=0V

V_B=–I_3R_3=–10×6=–60(V)

V_C=I_1R_1=4×20=80(V)

V_D=I_2R_2=6×5=30(V)

U_{CD}=V_C–V_D=80–30=50(V)

以 B 点为电位参考点时有：

V_B=0V

V_A=I_3R_3=10×6=60(V)

V_C=E_1=140(V)

V_D=E_2=90(V)

U_{CD}=V_C–V_D=140–90=50(V)

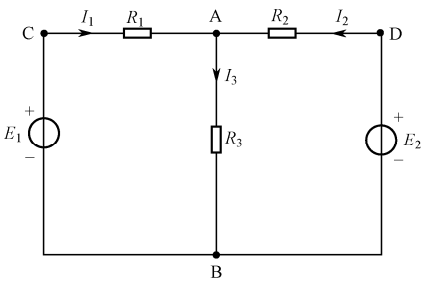


图 1-8　例 1.1 图

由此可见，电路中两点间的电压是绝对的，不随电位参考点的不同而发生变化，即电压值与电位参考点的选择无关；而电路中某一点的电位则是相对的，即电位参考点不同，该点电位值也将不同。

例 1.2　图 1-9 所示为某电路的部分电路，已知 E=4V，R=1Ω，求（1）当 U_{ab}=6V 时，I=？（2）当 U_{ab}=1V 时，I=？

解　（1）设定电路中物理量的参考方向如图 1-9 所示，则

$$U_{ab}=IR+E$$

$$I=\frac{U_{ab}-E}{R}=\frac{6-4}{1}=2\ (\mathrm{A})$$

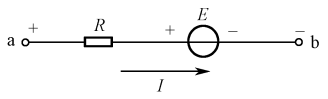


图 1-9　例 1.2 图

I>0 表明电流的实际方向与参考方向一致。

（2）当 U_{ab}=1V 时：

$$I=\frac{U_{ab}-E}{R}=\frac{1-4}{1}=-3\ (\mathrm{A})$$

I<0 表明电流的实际方向与参考方向相反。

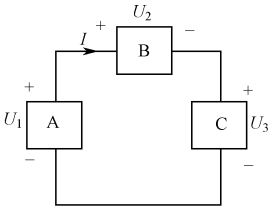


图 1-10　例 1.3 图

必须注意，在计算电路的某一电流或电压时，不事先标明电压和电流的参考方向，所求得的电流和电压的符号是没有意义的。

例 1.3　在如图 1-10 所示的电路中，已知 I=1A，U_1=12V，U_2=8V，U_3=4V。求各元件功率，并分析电路的功率平衡关系。

解　元件 A：电压 U_1 和电流 I 为非关联参考方向，则

$$P_1=-U_1I=-12\times1=-12\ (\mathrm{W})$$

$P_1<0$，说明元件产生 12W 功率，元件 A 为电源。

元件 B：电压 U_2 和电流 I 为关联参考方向，则

$$P_2=U_2I=8\times1=8\text{（W）}$$

$P_2>0$，说明元件吸收 8W 功率，元件 B 为负载。

元件 C：电压 U_3 和电流 I 为关联参考方向，则

$$P_3=U_3I=4\times1=4\text{（W）}$$

$P_3>0$，说明元件 C 吸收 10W 功率，元件 C 为负载。

$P_1+P_2+P_3=-12+8+4=0$W，功率平衡。



实践操作 —— 做一做

在实验线路板上连接图 1-8 所示电路，用万用表测量各元件的电流及电压，在测量时应注意：

（1）直流电流表的使用方法

直流电流表用于测量直流电路中的电流，指针式直流电流表使用方法如下：

① 调零。直流电流表水平放置，当指针不在零刻度时，可以用螺钉旋具轻轻调仪表的指针机械调零螺钉，使指针指在零刻度位置。

② 量程的选择。测量前要预先计算被测电流的数值，选择合适的量程，在未知电流大小时，应将量程放置在最高挡位，以免损坏仪表。测量时如指针偏转角太小，为了提高读数的准确性，再改用小量程进行测量。

③ 表头连接。测量时要把直流电流表串联到被测电路中，使电流从电流表的“＋”接线端钮流入，从“–”接线端钮流出，不要接错。

④读数，根据仪表指针最后停留的位置，按指示刻度读出相对应的电流值。读数时要注意，眼、指针、镜影针三点为一线，这样读数的误差最小。

（2）直流电压表的使用方法

直流电压表用于测量直流电路中的电压。直流电压表使用方法与直流电流表的使用方法基本相同，不同之处在于表头的连接方法，测量时应把直流电压表并联到被测量元件或被测电路的两端，“＋”接线端钮接在被测电路的高电位端，“－”接线端钮接在被测电路的低电位端。



问题研讨 —— 想一想

根据上述测试结果，请思考下列问题：

（1）与已知的电流、电压或计算的电位、电压进行比较，分析产生误差的原因。

（2）如何通过测量结果求出各元件的功率及电路的总功率？

（3）如何判断两电源在电路中的作用？

（4）在分析电路时，电压、电流的参考方向能否随意改变？为什么？

1.1.3 电路的三种工作状态

知识链接 —— 学一学

电路有三种可能的工作状态：通路、断路和短路。

1. 通路

通路就是电源与负载接成闭合回路，即图 1-11 所示电路中开关 S 合上时的工作状态。短距离输电导线的电阻很小，常忽略不计，于是负载的电压降 U_L 就等于端电压降 U

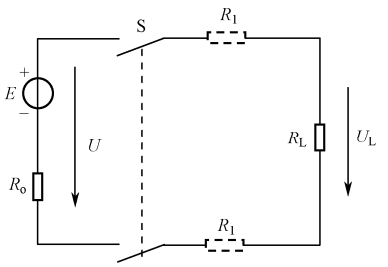


图 1-11　电路通路示意图

$$U = U_L = \frac{R_L}{R_0 + R_L} E \tag{1.11}$$

若输电导线较长，就应当考虑它的电阻。实际上为了简化电路计算，常用等值的集中电阻来代表实际导线的分布电阻，如图 1-11 中用虚线表示的电阻 R_l。

输电导线的横截面积应根据线路上的容许电压损失（一般规定为额定电压的 5%）和最大工作电流适当选定，截面过细导线的电压损失太大，过粗则浪费材料。

2. 断路（开路）

断路就是电源与负载没有接通成闭合回路，也就是图 1-11 电路中开关 S 断开时的工作状态。断路状态相当于负载电阻等于无穷大，电路的电流等于零，即

$$R_L=\infty，I=0$$

此时电源不向负载供给电功率，即

$$P_S=0，P_L=0$$

这种情况称为电源空载。电源空载时的端电压称为断路电压或开路电压。电源的开路电压 U_{OC} 就等于电源电动势 E，即

$$U_{OC}=E \tag{1.12}$$

3. 短路

短路就是电源未经负载而直接由导线接通成闭合回路，如图 1-12 所示。图中折线是指明短路点的符号。电源输出的电流就以短路点为回路而不流过负载。

若忽略输电线的电阻，短路时回路中只存在电源的内阻 R_0。这时的电流为

$$I_{SC} = \frac{E}{R_0} \tag{1.13}$$

I_{SC} 称为短路电流。因为电源内阻 R_0 一般都比负载电阻小得多，所以短路电流 I_{SC} 总是很大的。

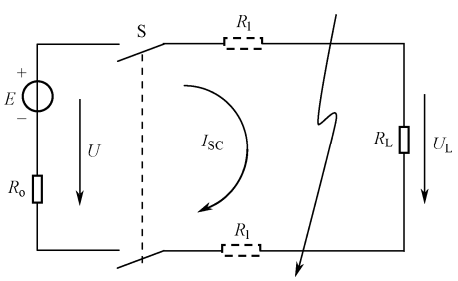


图 1-12　电路短路示意图

实际工作中，若电源短路状态不迅速排除，由于电流热效应，很大的短路电流将会烧毁电源、导线以及短路回路中接有的电流表、开关等，以致引起火灾。所以，电源短路是一种严重的事故，应严加防范。

许多短路事故是因绝缘损坏引起的；错误的接线或误操作也常导致电源短路。

为了避免短路事故所引起的严重后果，通常在电路中接入熔断器或自动断路器，以便在发生短路时迅速将故障电路自动切断。



实践操作 —— 做一做

在实验线路板上，按图 1-13 所示连接电路，电路图中的电源采用直流稳压电源，电压选择为 12V；灯泡选择 12V/2W。进行以下操作：

（1）合上开关 S，逐渐调大电源电压，直至 12V，观察灯泡情况。

（2）合上开关 S，测量线路中的电流及灯泡两端的电压。断开开关 S，测量线路中的电流及灯泡两端的电压，将测量数据记入表 1-1 中。

（3）断开开关 S，将电压表接在电流表左侧时，再分别将开关 S 闭合、断开，测量线路中电流及电压。

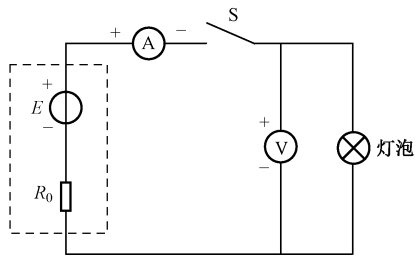


图 1-13　实践操作电路图

表 1-1　直流电流、电压测量结果

测试项目	电压表在电流表右侧时		电压表在电流表左侧时	
	开关闭合	开关断开	开关闭合	开关断开
电流 I				
电压 U				

（4）在图 1-13 所示电路中，断开开关 S，电源电压调为 12V，电阻 R_0=10 Ω，测量电源、灯泡、R_0 及开关两端的电压。闭合开关 S，灯泡用一根导线短接，用电压表分别测量电源、灯泡、R_0 及开关两端的电压，将测量数据填入表 1-2 中。

表 1-2　电路工作状态测量结果

测试项目	开　路				短　路			
	电源	灯泡	开关	R_0	电源	灯泡	开关	R_0
电压 U								
电流 I								

在测量时**应注意：**所有需要测量的电压值，均以电压表测量的读数为准。E_1、E_2 也需测量，不应取电源本身的显示值。



问题研讨 —— 想一想

（1）当开关 S 断开时，灯不亮，是因为电路中没有_____。合上开关 S，当电源电压

由 0V 逐渐增大至 12V 时，灯泡发光情况_____，要使灯泡正常发光，灯泡两端电压应（大于/小于/等于）灯泡的额定电压。

（2）对图 1-13 所示电路，开关 S 闭合，电压表分别接在电流表的左侧、右侧时，电流表、电压表的读数有何变化？为什么？在什么情况下将电压表接在电流表的左侧？又在什么情况下将电压表接在电流表的右侧？

（3）电路开路时，外电路的电阻对电源来说相当于多少？电路中电流为多少？电源两端的电压为多少？负载两端的电压为多少？

（4）电源短路时，外电路的电阻相当于_____（零/无穷大），电路中电流相当于_____（零/无穷大）。在电路的实际运行中，电源短路是不允许出现的，为了防止电源短路现象的发生，在实际电路中都采取了什么措施？

1.1.4 基尔霍夫定律及应用



知识链接 —— 学一学

基尔霍夫定律是集中参数电路的基本定律，它包括电流定律和电压定律。

1. 电路中几个常用术语

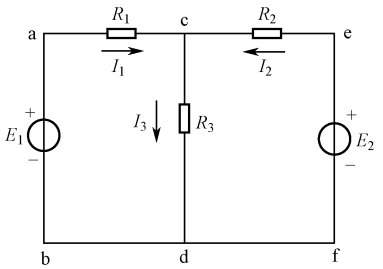


图 1-14 电路术语例图

（1）支路

一段含有电路元件而又无分支的电路称为支路。如图 1-14 所示，该电路中共有 3 条支路，分别为 cabd、cd、cefd 段电路。

一条支路中可以由一个元件或者由几个元件串联组成，支路中流过的电流为同一个电流，称为支路电流，如图 1-14 所示的 cabd、cd、cefd 各支路对应的支路电流分别为 I_1、I_2、I_3。

（2）节点

三条或三条以上的支路连接点称为节点，如图 1-14 所示的 c、d 点。

（3）回路

由支路组成的闭合路径称为回路。如图 1-14 所示的 acdba、cefdc、acefdba 等都是回路，该电路共有 3 条回路。一条回路由某个节点开始，绕行一周回到该节点，所经过的支路不可重复。

（4）网孔

如果回路内不再包含有支路，这样的回路称为网孔。如图 1-14 所示的 acdba、cefdc 是网孔，而 acefdba 不是网孔。

2. 基尔霍夫第一定律

基尔霍夫第一定律又称为节点电流定律，简称 KCL（Kirchhoff's Current Law），它用来确定连接在同一节点上的各支路电流间的关系。根据电荷的守恒性，电路中任何一点（包括节

点在内）均不能堆积电荷。因此任何时刻，流入某一节点的电流之和与流出该节点的电流之和相等，即

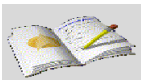
$$\Sigma I_{流入}=\Sigma I_{流出} \tag{1.14}$$

式（1.14）可以写成：$\Sigma I_{流入}-\Sigma I_{流出}=0$，即 $\Sigma I_{流入}+\Sigma(-I_{流出})=0$，式中的 $I_{流入}$、$I_{流出}$ 皆为电流的大小，如果考虑电流的方向和符号，将流入某一节点的电流取“＋”，流出该节点的电流取“－”，则基尔霍夫第一定律可以表述为：在任何时刻，某一节点的电流代数和为零，即

$$\Sigma I=0 \tag{1.15}$$

例如，在图 1-14 中，对于节点 c 有：$I_1+I_2-I_3=0$，根据基尔霍夫节点电流定律所列的节点电流关系式称为节点电流方程。

使用时应注意：列节点电流方程之前，必须先标明各支路的电流参考方向；对于含有 n 个节点的电路，只可以列出 $n-1$ 个独立的电流方程。



应用举例 —— 练一练

例 1.4　如图 1-15 所示的电路为某电路的一部分，已知，I_1=25 mA，I_3=10 mA，I_4=12 mA，试求电流 I_2、I_5、I_6。

解　电路中共有 a、b、c 三个节点，根据 KCL 可列三个节点电流方程：

节点 a，$I_1+I_4=I_2$

节点 b，$I_2+I_5=I_3$

节点 c，$I_5+I_4=I_6$

所以

I_2 =25 mA+12 mA=37 mA

$I_5=I_3-I_2$=10 mA–37mA=–27mA

$I_6=I_5+I_4$=–27mA+12 mA=–15mA

求得 I_5、I_6 的值带负号，表示电流的实际方向与所标的参考方向相反。

基尔霍夫节点电流定律不仅适用于节点，也可以将其推广应用于包围部分电路的任一假设的封闭面，即广义节点。如图 1-16 所示，封闭面（虚线表示）将三个节点包围后可以看成一个节点，若已知 I_1 和 I_2，则可以利用 KCL 列出电流方程：$I_1+I_2=I_3$，从而求出 I_3，对于封闭面所包围的内部电路可以不考虑，从而使问题得到了简化。

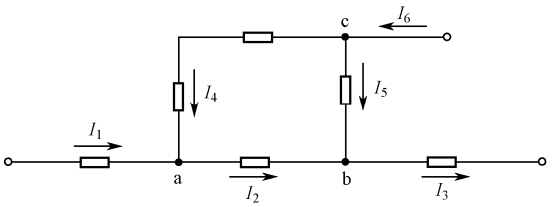


图 1-15　例 1.4 图

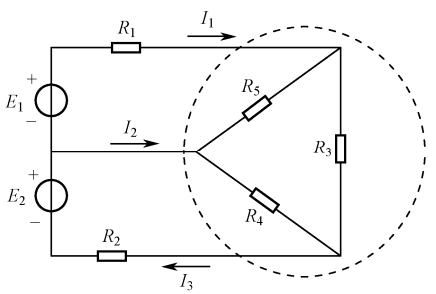


图 1-16　广义节点的示意图

3. 基尔霍夫第二定律

基尔霍夫第二定律又称为回路电压定律，简称 KVL（Kirchhoff's Voltage Law）。它用来确定回路中各段电压间的关系。在任何时刻，如果从回路任何一点出发，以顺时针方向（或逆时针方向）沿回路绕行一周，回路的路径上各段电压的代数和恒等于零，即

$$\sum U=0 \qquad (1.16)$$

根据 $\sum U=0$ 所列的方程，称为回路电压方程。

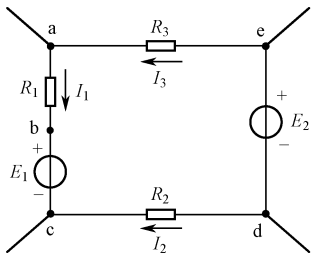


图 1-17　说明电压定律的电路图

以图 1-17 电路为例说明，沿着回路 abcdea 绕行方向，有：

$U_{ab}=R_1I_1$，$U_{bc}=E_1$，$U_{cd}=-R_2I_2$，$U_{de}=-E_2$，$U_{ea}=R_3I_3$

则　　$U_{ab}+U_{bc}+U_{cd}+U_{de}+U_{ea}=0$

即　　$R_1I_1+E_1-R_2I_2-E_2+R_3I_3=0$

上式也可写成 $R_1I_1-R_2I_2+R_3I_3=-E_1+E_2$

所以，任何时刻，在任何一闭合回路的路径上各电阻上的电压降代数和等于各电源电动势的代数和，即

$$\sum(RI)=\sum E \qquad (1.17)$$

使用基尔霍夫第二定律时应注意：列回路电压方程之前，必须先标明各段电路电压的参考方向和回路的绕行方向。当电压的参考方向与回路绕行方向一致时，该电压符号前取“＋”，否则，电压符号前取“–”；当利用 $\sum(RI)=\sum E$ 时，若电源电动势的方向（注意电动势方向由“－”极指向“＋”极）与回路绕行方向一致时，该电动势符号前取“＋”，否则，电动势符号前取“–”；对于含有 n 个节点、b 条支路的电路，只可以列出 $b-(n-1)$个独立的回路电压方程。

由上所述可知 KCL 规定了电路中任何一个节点各支路电流必须服从的约束关系，而 KVL 则规定了电路中任何一条回路内各支路电压必须服从的约束关系。这两个定律仅与元件相互连接的方式有关，而与元件的性质无关，所以这种约束称为结构约束或拓扑约束。



应用举例 —— 练一练

例 1.5　如图 1-18 所示电路为某电路的一部分，已知：$R_1=25\Omega$，$R_2=20\Omega$，$R_3=10\Omega$，$E_1=14\text{V}$，$E_2=24\text{V}$，$I_1=2\text{A}$，求 U_{AB}。

解　对 E_1、R_1、R_2、E_2 组成的回路，由 KVL 得：

$$I_1R_1+I_2R_2=-E_2+E_1$$

$$I_2=\frac{E_1-E_2-I_1R_1}{R_2}=\frac{14-24-2\times25}{20}=3\text{（A）}$$

由 KCL 得：$I_1-I_2-I_3=0$

所以

$$I_3=I_1-I_2=2-(-3)=5\text{（A）}$$

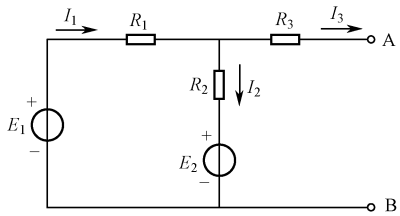


图 1-18　例 1.5 图

对 E_2、R_2、R_3、U_{AB} 所组成的回路，由 KVL 得：

$$U_{AB}-I_2R_2+I_3R_3=E_2$$

所以

$$U_{AB}=E_2+I_2R_2-I_3R_3=24+(-3)\times20-5\times10=-86\text{（V）}$$

问题研讨 —— 想一想

电路如图 1-19 所示。

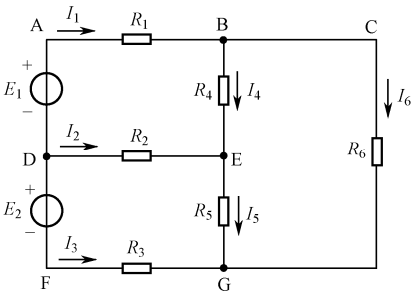


图 1-19　电路图

（1）此电路有几条支路、几个节点、几条回路、几个网孔？

（2）列出各节点的电流方程。

（3）列出各条回路的回路电压方程。

任务 1.2　电路的基本元件及其检测

任务描述

电路基本元件是构成电工电路的基础，本任务学习电阻器、电容器、电感器的参数，电流与电压的关系及其检测方法；电源元件、实际电源两种模型的等效变换及测试。

任务目标

了解电阻器、电容器、电感器的类型并能识别；理解电阻、电容、电感的参数定义、掌握其检测方法和伏安特性，能较熟练地进行电阻连接、电容连接的等效变换；掌握独立源外特性，能较熟练地进行实际电源两种模型的等效变换。

任务实施

1.2.1　电阻元件及其检测

知识先导 —— 认一认

观察图 1-20 所示的一些常用电阻器的外形。

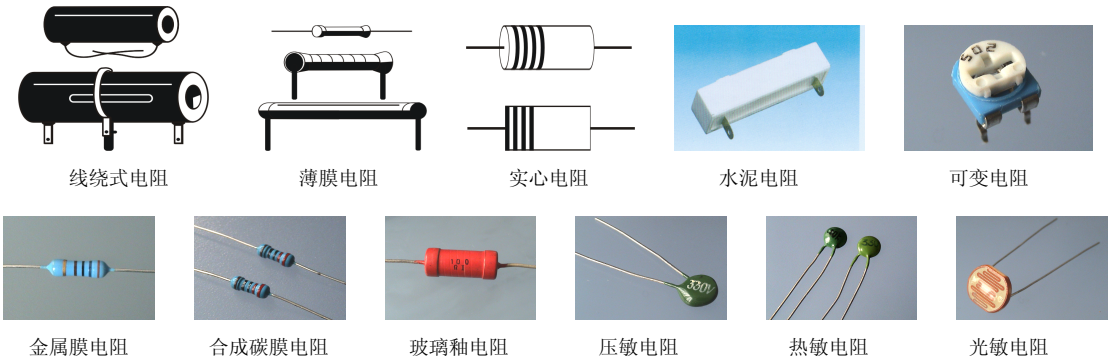


图 1-20　各种电阻器的外形



知识先导 —— 认一认

1. 电阻

（1）电阻元件

电阻是表示导体对电流起阻碍作用的物理量。任何导体对电流都具有阻碍作用，因此都有电阻。实际的电阻元件是利用某些对电流有阻碍作用的材料做成的，如实验用的电阻器、灯丝、电炉丝等，在使用中当然会表现出其他的电磁特性，如产生磁场等，但人们在研究其将电能转换成热能时，可以忽略其他次要的性质，只考虑其电阻性质，于是便抽象出电阻元件这一理想元件。

电阻常用的单位是欧姆（Ω），在实际使用中，有时还用到千欧（kΩ）、兆欧（MΩ）。

电阻的倒数称为电导，用 G 表示，即 $G=\dfrac{1}{R}$。电导的单位为西门子（S），$1\mathrm{S}=1\Omega^{-1}$。电导也是表征电阻元件的特性参数，它反映的是元件的导电能力。

（2）固定电阻器

① 固定电阻器的主要参数有如下几个。

额定功率：额定功率是指电阻器在规定的环境温度和湿度下，假设周围空气不流通，在长期连续工作而不损坏或基本不改变电阻器性能的情况下，电阻器上允许消耗的最大功率。当超过其额定功率使用时，电阻器的阻值及性能将会发生变化，甚至发热冒烟烧毁。因此一般选用电阻器的额定功率时要有余量，即选用比实际工作中消耗的功率大 1~2 倍的额定功率。表 1-3 列出了常用电阻器的额定功率系列。

表 1-3　常用电阻器额定功率系列

种　类	电阻器额定功率系列（W）
线绕	0.05　0.125　0.25　0.5　1　2　4　8　10　16　25　40　50　75　100　150　250　500
非线绕	0.05　0.125　0.25　0.5　1　2　5　10　25　50　100

电阻器的额定功率符号表示如图 1-21 所示。

标称阻值（简称标称值）及允许误差：标注在电阻器上的电阻值称为标称值。电阻的实际值对于标称值的最大允许偏差范围称为电阻器的允许误差，它表示产品的精度。标称值是

产品标志的“名义”阻值。通用电阻器的标称值系列和允许误差等级如表 1-4 所示。

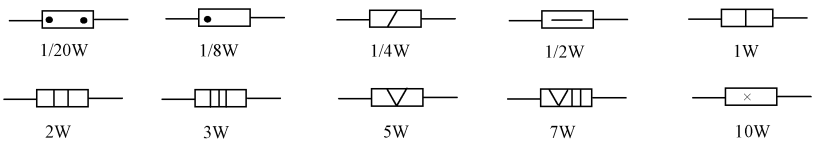


图 1-21　固定电阻器额定功率的符号标志

任何电阻器的标称阻值均是表 1-4 所列数值的 10^n 倍（n 为整数），精密电阻的误差等级有±0.05%，±0.2%，±0.5%，±1%，±2%等，其他电阻器的允许误差分为Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级，如表 1-4 所示。

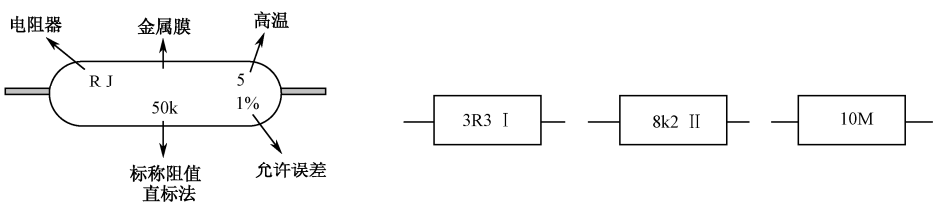
表 1-4　通用电阻器的标称值系列

系列	允许误差	电阻器标称值系列
E24	Ⅰ级　±5%	1.0　1.1　1.2　1.3　1.5　1.6　1.8　2.0　2.4　2.7　3.0　3.3 3.6　3.9　4.3　4.7　5.1　5.6　6.2　6.8　7.5　8.2　9.1
E12	Ⅱ级　±10%	1.0　1.2　1.5　1.8　2.2　2.7　3.3　3.9　4.7　5.6　6.8　8.2
E6	Ⅲ级　±20%	1.0　1.5　2.2　3.3　4.7　6.8

最高工作电压：最高工作电压是指电阻器长期工作不发生过热或电击穿的工作电压限度。

电阻的参数表示方法有直标法、文字符号法及色环法。

直标法：是将电阻器的主要参数和技术性能用数字或字母直接标注在电阻器表面上，这种方法主要用于功率较大的电阻器。例如电阻器表面上印有 RXYC-50-T-1K5-±10%，其含义是耐潮釉线绕可调电阻器，额定功率为 50W，阻值为 1.5kΩ，允许误差为±10%。对小于 1000Ω 的阻值只标出数值，不标单位；对 kΩ、MΩ只标注 k、M，如图 1-22（a）所示。



（a）直标法　　（b）文字符号法

图 1-22　电阻规格标注法

文字符号法：是将需要标出的主要参数与技术性能用文字、数字符号两者有规律地组合起来标注在电阻器上。随着电子元件的不断小型化，特别是表面安装元件器的制造工艺不断进步，使得电阻器的体积越来越小，因此其元件表面上标注的文字符号也进行了相应的改革。一般仅用 3 位数字标注电阻器的数值，精度等级不再表示出来（一般小于±5%）。具体规定为元件表面涂以黑色表示电阻器；电阻器的基本标注单位是欧（Ω），其数值大小用 3 位数字标注，前两位数字表示数值的有效数字，第三位数字表示数值的倍率（乘数），例如，100 表示其阻值为 $10\times10^0=10\Omega$，223 表示其阻值为 $22\times10^3=22\text{k}\Omega$。

对于字母和数字组合表示的，字母符号 R、k、M 之前的数字表示电阻值的整数值，之后

的数表示电阻值的小数值，字母符号表示小数点的位置和电阻值单位，例如，8k2 表示 8.2kΩ。精度等级标Ⅰ级或Ⅱ级，Ⅲ级不标明。如图 1-22（b）所示。

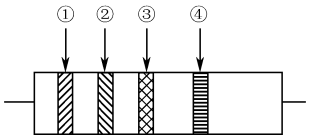


图 1-23　色环标注法

色标法（又称色环标注法）：对体积很小的电阻和一些合成电阻器，其阻值和误差常用色环来标注，如图 1-23 所示。色环标注法有四环和五环两种。

四环电阻的一端有四道色环，第一道环和第二道环分别表示电阻的第一位和第二位有效数字，第三道环表示 10 的乘方数（10^n，n 为颜色所表示的数字），第四道环表示允许误差（若无第四道色环，则误差为±20%）。色环电阻的单位一律为Ω，表 1-5 列出了色环电阻所表示的数字和允许误差。例如，某电阻有四道色环，分别为黄、紫、红、金，则其色环的意义为：①环—黄色，4；②环—紫色，7；③环—红色，10^2；④环—金色，±5%；其阻值为：4700Ω±5% 。

表 1-5　色环颜色所表示的有效数字和允许误差

色　别	银	金	黑	棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	无色
有效数字	—	—	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	—
乘方数	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	—
允许误差	±10%	±5%	—	±1%	±2%	—	—	±0.5 %	±0.2%	±0.1%	—	—	±20%
误差代码	K	J		F	G			D	C	B			M

精密电阻器一般用五道色环标注，它用前三道色环表示三位有效数字，第 4 道色环表示 10^n（n 为颜色所代表的数字），第 5 道色环表示阻值的允许误差。例如，如某电阻的五道色环为：橙橙红红棕，则其阻值为：332×10^2±1%Ω。

在色环电阻器的识别中，找出第 1 道色环是很重要的，可用如下方法识别：在四环标志中，第 4 道色环一般是金色或银色，由此可推出第 1 道色环。在五环标志中，第一道色环与电阻的引脚距离最短，由此可识别出第 1 道色环。

采用色环标志的电阻器，颜色醒目，标志清晰，不易退色，从不同的角度都能看清阻值和允许偏差。目前在国际上都广泛采用色标法。

② 固定电阻器的检测。当电阻的参数标志因某种原因脱落或欲知道其精确阻值时，就需要用仪器对电阻的阻值进行测量。对于常用的碳膜、金属膜电阻器以及线绕电阻器的阻值，可用普通指针式万用表的电阻挡直接测量。在具体测量时应注意以下几点：

合理选择量程，先将万用表功能选择置于“Ω”挡，由于指针式万用电表的电阻挡刻度线是一条非均匀的刻度线，因此必须选择合适的量程，使被测电阻的指示值尽可能位于刻度线的 0 刻度到全程 2/3 的这一段位置上，这样可提高测量的精度。对于上百千欧的电阻器，则应选用 $R\times10$k 挡来进行测量。

注意调零，所谓“调零”就是将电表的两只表笔短接，调节“调零”旋钮使表针指向表盘上的“0Ω”位置上。“调零”是测量电阻器之前必不可少的步骤，而且每换一次量程都必须重新调零一次。顺便指出，若“调零”旋钮已调到极限位置，但指针仍回不到“0Ω”位置，说明电表内部的电池电压已不足了，应更换新电池后再进行调零和测量。

读数要准确，在观测被测电阻的阻值读数时，两眼应位于电表指针的正上方（万用表应

水平放置），同时注意双手不能同时接触被测电阻的两根引线，以免人体电阻的存在影响测量的准确性。

（3）电位器（可变电阻器）的主要参数识别与检测

① 电位器的参数。电位器的主要参数除与电阻器相同之外还有如下参数。

阻值的变化形式：这是指电位器的阻值随转轴旋转角度的变化关系，可分为线性电位器和非线性电位器。常用的有直线式、对数式、指数式，分别用 X、D、Z 来表示，如图 1-24 所示。

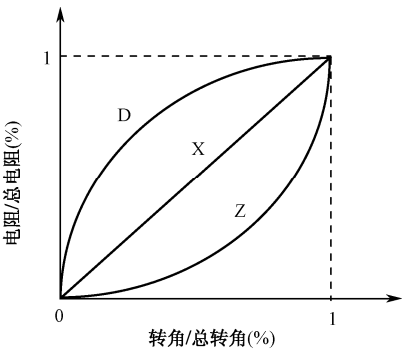


图 1-24　电位器输出特性的函数关系

直线式电位器适用于作为分压器，常用于示波器的聚焦和万用表的调零等方面；对数式电位器常用于音调控制和电视机的黑白对比度调节，其特点是先粗调后细调；指数式电位器常用于收音机、录音机、电视机等的音量控制，其特点是先细调后粗调。X、D、Z 字母符号一般印在电位器上，使用时应特别注意。

动态噪声：由于电阻体阻值分布的不均匀性和滑动触点接触电阻的存在，电位器的滑动臂在电阻体上移动时会产生噪声，这种噪声对电子设备的工作将产生不良影响。

② 电位器的测试。主要测试要求：电位器的总阻值要符合标志数值，电位器的中心滑动端与电阻体之间要接触良好，其动噪声和静噪声应尽量小，其开关应动作准确可靠。

检测方法：先测量电位器的总阻值，即两端片之间的阻值应为标称值，然后再测量它的中心端片与电阻体的接触情况。将一只表笔接电位器的中心焊接片，另一只表笔接其余两端片中的任意一个，慢慢将其转柄从一个极端位置旋转至另一个极端位置，其阻值则应从零（或标称值）连续变化到标称值（或零）。在整个旋转过程中，万用表的指针不应有跳动现象。在电位器转柄的旋转过程中，应感觉平滑，松紧适中，不应有异常响声。开关接通时，开关两端之间的阻值应为零；开关断开时，其阻值应为无穷大。

2. 电阻元件的伏安特性

电流和电压的大小成正比的电阻元件称为线性电阻元件。电阻元件两端的电压与流过的电流之间的关系，称为电阻元件的伏安特性。线性电阻的伏安特性为通过坐标原点的直线，直线的斜率反映了阻值的大小。线性电阻的伏安特性如图 1-25 所示，欧姆定律的表达式为：

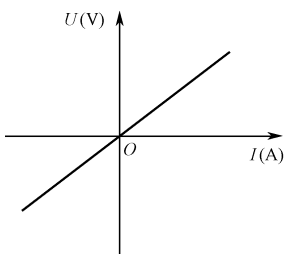


图 1-25　线性电阻的伏安特性

$$U=RI \tag{1.18}$$

电流和电压的大小不成正比的电阻称为非线性电阻，本书如不特别加以说明的电阻都是线性电阻。

电阻器是电路中应用最广泛的电子元件之一，在电路中起分压、分流、降压、限流、负载、阻抗匹配及与其他元器件配合完成相应的功能等作用。

3. 电阻的串联、并联和混联

（1）电阻的串联

在电路中，把几个电阻元件依次首、尾连接起来，中间没有分支，这种连接方式称为电阻的串联。串联电路中，各元件（电阻）中通过同一电流，其端电压是各元件电压之和。图 1-26（a）所示是两个电阻串联的电路。

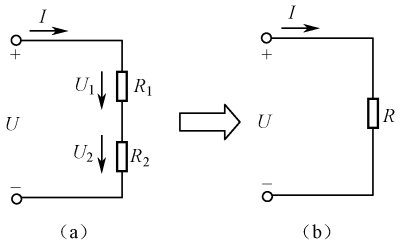


图 1-26　电阻的串联

等效电阻：对图 1-26（a）所示的电阻串联电路 $R=R_1+R_2$ 时，图 1-22（b）中所示的 R 便是图 1-26（a）所示的等效电阻。

一般地有：

$$R=\sum_{i=1}^{n}R_i \tag{1.19}$$

式（1.19）说明：n 个线性电阻串联的等效电阻等于各电阻之和。

在图 1-26（a）所示电路中，各电阻上所分配的电压可由下式计算：

$$\begin{cases} U_1=R_1I=R_1\dfrac{U}{R}=\dfrac{R_1}{R}U \\ U_2=R_2I=R_2\dfrac{U}{R}=\dfrac{R_2}{R}U \end{cases}$$

写成一般形式为：

$$U_i=\frac{R_i}{R}U \tag{1.20}$$

式（1.20）是电阻串联电路的分压公式，它说明第 i 个电阻上分配到的电压取决于这个电阻与总的等效电阻的比值，这个比值称为分压比。尤其要说明的是，当其中某个电阻较其他电阻小很多时，分压比将很小，这个小电阻两端的电压也较其他电阻上的电压低很多，因此在工程估算时，这个小电阻的分压作用就可以忽略不计。

（2）电阻的并联

在电路中，把几个电阻元件的首、尾两端分别连接在两个公共节点上，这种连接方式称为电阻的并联。在并联电路中，各并联支路（电阻）上受同一电压作用；总电流等于各支路电流之和。图 1-27（a）所示是两个电阻并联的电路。

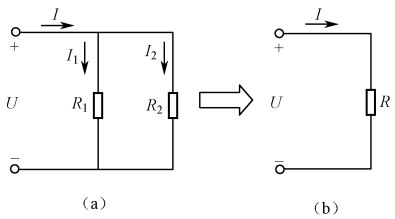


图 1-27　电阻的并联

等效电阻：图 1-27（a）中所示两个并联电阻可用图 1-27（b）中所示的一个等效电阻 R 来代替。

$\dfrac{1}{R}=\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_2}$ 或 $G=G_1+G_2$ 时，图 1-27（b）中所示的 R 便是图 1-27（a）所示的等效电阻。

一般地有：

$$\frac{1}{R}=\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{R_i}\quad 或\quad G=\sum_{i=1}^{n}G_i \tag{1.21}$$

可见，n 个电阻并联时，其等效电导等于各电导之和。由式（1.21）可知，如果 n 个阻值相同的电阻并联，其等效电阻是各支路电阻的 $1/n$ 倍。并联电阻的个数越多，等效电阻反而越小。

图 1-27（a）所示电路中，各支路电流分别为：

$$\left.\begin{aligned} I_1 &= \frac{U}{R_1} = \frac{R}{R_1} I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \\ I_2 &= \frac{U}{R_2} = \frac{R}{R_2} I = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \end{aligned}\right\} \tag{1.22}$$

式（1.22）是两个电阻并联电路的分流公式。当总电流 I 求出后，利用此式可方便地求得各并联支路电流。

（3）电阻的混联

电阻的串联和并联相结合的连接方式，称为电阻的混联。只有一个电源作用的电阻串、并联电路，可用电阻串、并联化简的方法，化简成一个等效电阻和电源组成的单回路，这种电路又称为简单电路。反之， 不能用串、并联等效变换化简为单回路的电路则称为复杂电路。简单电路的计算步骤是：首先将电阻逐步化简成一个总的等效电阻，算出总电流（或总电压），然后用分压、分流的公式逐步计算出化简前原电路中各电阻的电流和电压，再计算出功率。



应用举例 —— 练一练

例 1.6　如图 1-28（a）所示的电路，求 A、B 两点间的等效电阻 R_{AB}。

解　将电路图中间无电阻导线缩为一个点后，可看出左侧两个 2Ω电阻为并联关系，上面两个 4Ω电阻为并联关系，将并联后的等效电阻替换图 1-28（a），结果如图 1-28（b）所示。图 1-28（b）中右侧两个 2Ω电阻串联后与中间 4Ω电阻并联等效为一个 2Ω电阻，如图 1-28（c）所示，由图 1-28（c）得：

$$R_{AB} = \frac{(2+1)\times 3}{(2+1)+3} = 1.5(\Omega)$$

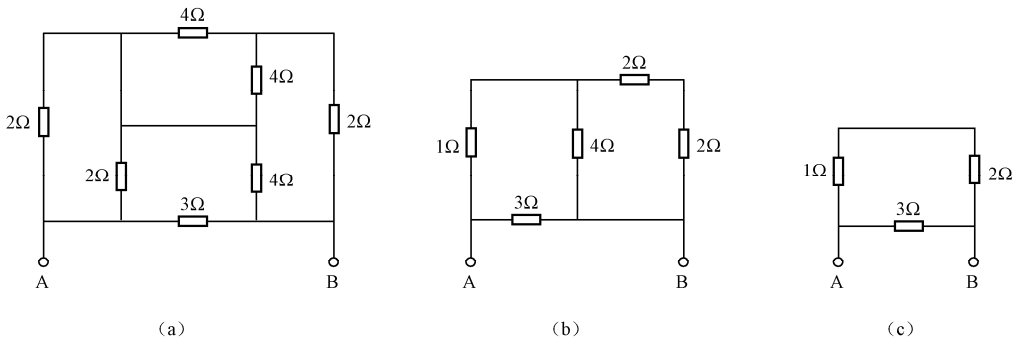


图 1-28　例 1.6 图

求解简单电路，关键是判断哪些电阻串联，哪些电阻并联。一般情况下，通过观察可以进行判断。当电阻串、并联的关系不易看出时，可以在不改变元件间连接关系的条件下将电路画成比较容易判断的串、并联的形式，这时无电阻的导线最好缩成一点，并且尽量避免相

互交叉。重画时可以先标出各节点代号， 再将各元件连在相应的节点间。

4. 电阻的星形连接与三角形连接

（1）等效网络

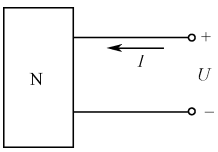


图 1-29　二端网络

如果一个电路只通过两个端钮与外部相连，在分析电路时可视其为一个整体，这样的电路就称为二端网络。例如，几个电阻的串联（或并联）电路就可看成二端网络；一个电流源与电阻并联电路亦可视为二端网络。每一个元件都是一个最简单的二端网络。图 1-29 是二端网络的一般符号，图中所选端电压 U、端电流 I 的参考方向为关联方向。

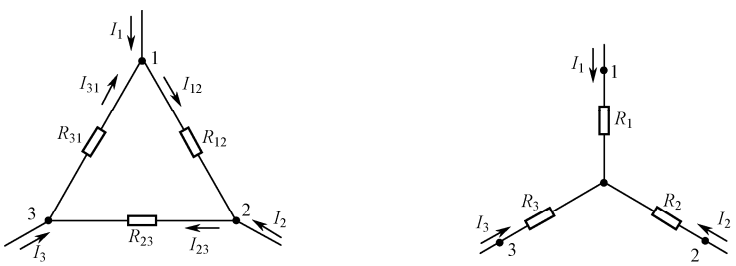
若两个二端网络具有相同的外特性，则这样的两个网络是等效网络。各等效网络的内部结构虽不尽相同，但对外电路而言，它们的影响是相同的，即若把两个等效网络予以互换，它们的外部情况不变。

一个内部没有独立源的电阻性二端网络。总可以与一个电阻元件等效，这个电阻元件的电阻值等于该网络关联参考方向下端电压与端电流的比值，称为该网络的等效电阻或输入电阻，用 R_i 表示。

此外，还有三端，……，n 端网络。两个 n 端网络，如果对应各端钮的电压、电流关系相同，则它们也是等效的。进行网络的等效变换，是分析计算电路的一个重要手段。用结构较简单的网络等效代替结构较复杂的网络，将简化电路的分析计算。

（2）电阻的星形连接与三角形连接

三个电阻元件首、尾相连， 连成一个三角形，就称为三角形连接， 简称△形连接， 如图 1-30（a）所示。三个电阻元件的一端连接在一起， 另一端分别连接到电路的三个节点， 这种连接方式称为星形连接，简称 Y 连接， 如图 1-30（b）所示。



（a）电阻的三角形连接　　（b）电阻的星形连接

图 1-30　电阻三角形和星形连接

在电路分析中，常利用 Y 网络与△形网络的等效变换来简化电路的计算。根据等效网络的定义，在图 1-30 所示的△形网络与 Y 网络中，若电压 U_{12}、U_{23}、U_{31} 和电流 I_1、I_2、I_3 都分别相等，则两个网络对外是等效的。据此，可导出 Y 连接电阻 R_1、R_2、R_3 与△形连接电阻 R_{12}、R_{23}、R_{31} 之间的等效关系。

应用 KVL 于图 1-30（a）中的回路 1231，有：

$$R_{12}I_{12} + R_{23}I_{23} + R_{31}I_{31} = 0$$

由 KCL 有：

$$I_{23}=I_2+I_{12}\text{，}\quad I_{31}=I_{12}-I_1$$

代入上式得：

$$R_{12}I_{12}+R_{23}\left(I_2+I_{12}\right)+R_{31}\left(I_{12}-I_1\right)=0$$

整理，得：

$$I_{12}=\frac{R_{31}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}I_1-\frac{R_{23}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}I_2$$

$$U_{12}=R_{12}I_{12}=\frac{R_{12}R_{31}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}I_1-\frac{R_{12}R_{23}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}I_2$$

同理：$U_{23}=\dfrac{R_{12}R_{23}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}I_2-\dfrac{R_{23}R_{31}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}I_3$，$U_{31}=\dfrac{R_{23}R_{31}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}I_3-\dfrac{R_{12}R_{31}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}I_1$。

对于图 1-30（b）有：$U_{12}=R_1I_1-R_2I_2$，$U_{23}=R_2I_2-R_3I_3$，$U_{31}=R_3I_3-R_1I_1$

比较电阻三角形连接时的 U_{12}、U_{23}、U_{31} 和星形连接时的 U_{12}、U_{23}、U_{31}，可知：若满足等效条件，两种连接时的 I_1、I_2、I_3 前面的系数必须相等，即

$$\left.\begin{aligned}R_1&=\frac{R_{12}R_{31}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}\\R_2&=\frac{R_{23}R_{12}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}\\R_3&=\frac{R_{31}R_{23}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}\end{aligned}\right\}\qquad(1.23)$$

式（1.23）就是从已知的三角形连接电阻变换为等效星形连接电阻的计算公式。解方程组（1.23），可得

$$\left.\begin{aligned}R_{12}&=\frac{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}{R_3}=R_1+R_2+\frac{R_1R_2}{R_3}\\R_{23}&=\frac{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}{R_1}=R_1+R_3+\frac{R_2R_3}{R_1}\\R_{31}&=\frac{R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1}{R_2}=R_1+R_2+\frac{R_3R_1}{R_2}\end{aligned}\right\}\qquad(1.24)$$

式（1.24）就是从已知的星形连接电阻变换为等效三角形连接电阻的计算公式。

若三角形（或星形）连接的三个电阻相等，则变换后的星形（或三角形）连接的三个电阻也相等。若三角形连接的三个电阻 $R_{12}=R_{23}=R_{31}=R_{\triangle}$，则等效星形连接的三个电阻为：

$$R_{\mathrm{Y}}=R_1=R_2=R_3=\frac{R_{\Delta}}{3}\qquad(1.25)$$

若星形连接的三个电阻 $R_1=R_2=R_3=R_{\mathrm{Y}}$，则等效三角形连接的三个电阻为：

$$R_{\Delta}=R_{12}=R_{23}=R_{31}=3R_{\mathrm{Y}}\qquad(1.26)$$



应用举例 —— 练一练

例 1.7　求图 1-31（a）所示电路中 A、B 两端的输入电阻 R_{AB}，已知，$R_1=R_2=R_3=6\Omega$，$R_4=R_5=R_6=2\Omega$。

解 将连成星形的电阻 R_4、R_5、R_6 变换为三角形连接的等效电阻，其电路如图 1-31（b）所示。

由于 R_4=R_5=R_6=2Ω，所以应用式（1.26）得：

$$R_1' = R_2' = R_3' = 3 \times 2 = 6\Omega$$

由图 1-31（b）可得：

$$R_{AB} = (R_1 // R_1') //(R_2 // R_2' + R_3 // R_3') = (6//6)//(6//6+6//6) = 2\Omega$$

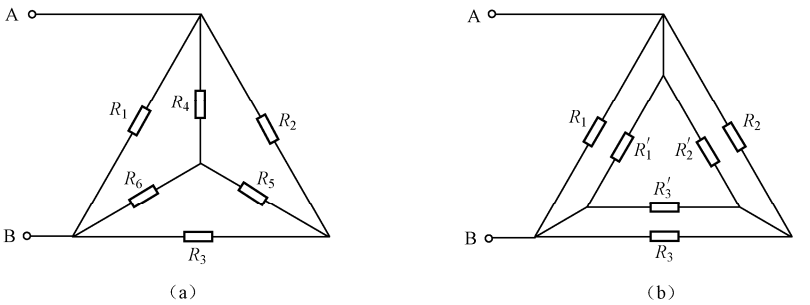


图 1-31　例 1. 7 图

例 1.8　在图 1-32（a）所示的电路中，已知 U_S=225V，R_0=1Ω，R_1=40Ω，R_2=36Ω，R_3=50Ω，R_4=55Ω，R_5=10Ω，试求，各电阻的电流。

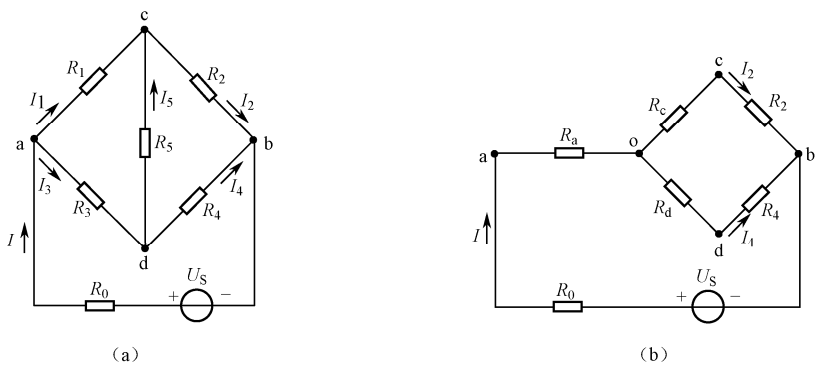


图 1-32　例 1.8 图

解 将图 1-32（a）中△形连接的 R_1、R_3、R_5 等效变换为 Y 连接的 R_a、R_c、R_d，如图 1-32（b）所示，代入式（1.24）求得

$$R_a = \frac{R_3 R_1}{R_5 + R_3 + R_1} = \frac{50 \times 40}{10 + 50 + 40} = 20 \ (\Omega)$$

$$R_c = \frac{R_1 R_5}{R_5 + R_3 + R_1} = \frac{40 \times 10}{10 + 50 + 40} = 4 \ (\Omega)$$

$$R_d = \frac{R_5 R_3}{R_5 + R_3 + R_1} = \frac{10 \times 50}{10 + 50 + 40} = 5 \ (\Omega)$$

图 1-32（b）是电阻混联网络，R_c 与 R_2 串联，其等效电阻为：

$$R_{c2}=R_c+R_2=4+36=40\ (\Omega)$$

R_d 与 R_4 串联，其等效电阻为：

$$R_{d4}=R_d+R_4=5+55=60（\Omega）$$

R_{c2} 与 R_{d4} 并联，其等效电阻为：

$$R_{ob}=\frac{40\times 60}{40+60}=24\ （\Omega）$$

R_a 与 R_{ob} 串联，a、b 间桥式电阻的等效电阻为：

$$R_{ab}=20+24=44（\Omega）$$

则

$$I=\frac{U_S}{R_0+R_{ab}}=\frac{225}{1+44}=5\ （A）$$

R_2、R_4 的电流分别为：

$$I_2=\frac{R_{d4}}{R_{c2}+R_{d4}}I=\frac{60}{40+60}\times 5=3\ （A）$$

$$I_4=\frac{R_{c2}}{R_{c2}+R_{d4}}I=\frac{40}{40+60}\times 5=2\ （A）$$

为了求得 R_1、R_3、R_5 的电流，从图 1-27（b）求得：

$$U_{ac}=R_aI+R_cI_2=20\times 5+4\times 3=112（V）$$

利用图 1-32（a）所示的电路，求得：

$$I_1=\frac{U_{ac}}{R_1}=\frac{112}{40}=2.8\ （A）$$

由 KCL 得：

$$I_3=I-I_1=5-2.8=2.2（A）$$

$$I_5=I_3-I_4=2.2-2=0.2（A）$$



实践操作 —— 做一做

① 电阻器的识别。根据表 1-6 中的电阻的阻值，写出的色环颜色并填入表 1-6 中；根据表 1-6 中的电阻色环颜色，读出电阻的阻值并填入表 1-6 中。

表 1-6　色环电阻的识读

环　数	电阻的阻值	第一环	第二环	第三环	第四环	第五环
四环	27（1±10%）kΩ					
	100（1±5%）Ω					
		红	红	橙	无色	
五环	1（1±10%）kΩ					
	680（1±2%）Ω					
		棕	紫	绿	金	棕

② 用万用表的电阻挡，测量 10 只电阻的阻值，并记录于自拟表中。**应注意：**电阻阻值的实际测量值与标称值存在误差。

③ 用直流稳压电源、毫安表、电阻（1kΩ），在实验线路板上连接电路。接通电源，将电

源电压从 0V 开始逐渐增加到 10V，用万用表测量电阻两端的电压，每增加 2V 记录一次电流值，画出该电阻的伏安特性曲线。



问题研讨 —— 想一想

精密型电阻的色环一般是_____（四环/五环）；色环电阻上的色环一般可以表示电阻的_____、_____、_____；按照色环的印制规定，离电阻器端边_____（最近/较远）的为首环，_____（最近/较远）的为尾环。

1.2.2 电容元件及其检测



知识先导 —— 认一认

观察图 1-33 所示的一些常用电容器的外形。

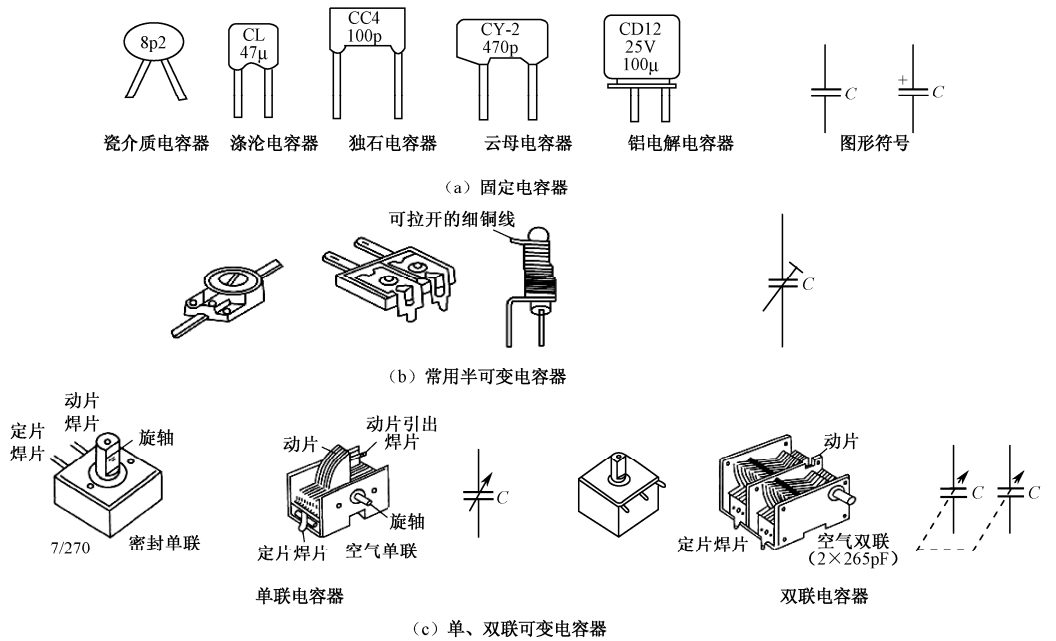


图 1-33　常见电容器的外形及符号



知识链接 —— 学一学

1. 电容

（1）电容元件

由物理知识知道，任何两个彼此靠近而且又相互绝缘的导体都可以构成电容器。这两个导体称为电容器的极板，它们之间的绝缘物质称为介质。

在电容器的两极板间加上电源后，极板上分别积聚起等量的异性电荷，在介质中建立起

电场，并且储存电场能量。电源移去后，由于介质绝缘，电荷仍然可以聚集在极板上，电场继续存在。所以，电容器是一种能够储存能量的器件，这就是电容器的基本电磁性能。但在实际中，当电容器两端的电压变化时，介质中往往有一定的介质损耗，而且介质也不可能完全绝缘，因而也存在一定的漏电流。如果忽略电容器的这些次要性能，就可以用一个代表其基本性能的理想二端元件作为模型，电容元件就是实际电容器的理想化模型。

（2）电容

电容元件是一个理想的二端元件，它的图形符号如图 1-34 所示，其中＋q 和–q 代表该元件正、负极板上的电荷量。若电容元件上的电压参考方向规定为由正极板指向负极板，则任何时刻都有以下关系：

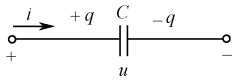


图 1-34　线性电容元件的图形符号

$$C=\frac{q}{u} \qquad (1.27)$$

式中，C 是用以衡量电容元件容纳电荷本领大小的一个物理量，称为电容元件的电容量，简称电容。

电容的 SI 单位为法（拉），符号为 F；1 F=1 C/V。电容器的电容往往比 1F 小得多，因此，常采用微法（μF）和皮法（pF）作为其单位，其换算关系为：

$$1\text{F}=10^{6}\mu\text{F}=10^{12}\text{pF}$$

如果电容元件的电容为常量，不随它所带电量的变化而变化，这样的电容元件即为线性电容元件。本书不特别加以说明时，所说的电容都是线性电容元件。

电容元件和电容器也简称为电容。所以，电容一词有时指电容元件（或电容器），有时则指电容元件（电容器）的电容量。

（3）电容器的分类

电容器的种类很多，按介质不同，可分为空气介质电容器、纸介电容器、有机薄膜电容器、瓷介电容器、玻璃釉电容器、云母电容器、电解电容器等；按结构不同，可分为固定电容器、半可变电容器、可变电容器等。

固定电容器：固定电容器的电容量是不可调节的，常用的几种固定电容器的外形和图形符号如图 1-33（a）所示。

半可变电容器：半可变电容器又称微调电容器或补偿电容器。其特点是容量可在小范围内变化，可变容量通常在几 pF 或几十 pF 之间，最高可达 100pF（陶瓷介质时）。半可变电容器通常用于整机调整后，电容量不需经常改变的场合，它的图形符号及常见外形如图 1-33（b）所示。

可变电容器：可变电容器的容量可在一定范围内连续变化，它由若干片形状相同的金属片并接成一组（或几组）定片和一组（或几组）动片。动片可以通过转轴转动，以改变动片插入定片的面积，从而改变电容量。其介质有空气、有机薄膜等。可变电容器有“单联”、“双联”和“三联”之分，外形及电路符号如图 1-33（c）所示。

（4）电容器的参数识别与电容器的检测

① 电容器的主要参数。标称容量：电容器上标注的电容量值，称为标称容量。固定电容器的标称容量系列见表 1-7，任何电容器的标称容量都满足表中标称容量系列再乘以 10^{n}（n 为正或负整数）。

表 1-7　固定电容器容量的标称值系列

电容器类别	允许误差	标称值系列
高频纸介质、云母介质 玻璃釉介质 高频（无极性）有机薄膜介质	±5%	1.0　1.1　1.2　1.3　1.5　1.6　1.8　2.0 2.2　2.4　2.7　3.0　3.3　3.6　3.9　4.3　4.7　5.1　5.6　6.2 6.8　7.5　8.2　9.1
纸介质、金属化纸介质 复合介质 低频（有极性）有机薄膜介质	±10%	1.0　1.5　2.0　2.2　3.3　4.0　4.7　5.0 6.0　6.8　8.2
电解电容器	±20%	1.0　1.5　2.2　3.3　4.7　6.8

电容器的标称容量标注方法如下：

a. 直标法：在产品的表面上直接标注产品的主要参数和技术指标的方法。例如：33μF±5%、32V。

b. 文字符号法：将主要参数与技术性能用文字、数字符号有规律地组合标注在产品的表面上。采用文字符号法时，将容量的整数部分写在容量单位标志符号前面，小数部分放在单位符号后面。如：3.3pF 标注为 3p3，1000pF 标注为 1n，6800pF 标注为 6n8，2.2μF 标注为 2μ。

c. 数字表示法：体积较小的电容器常用数字标注法。一般用三位整数，第一位、第二位为有效数字，第三位表示有效数字后面零的个数，单位为皮法（pF），但是当第三位数是 9 时表示 10^{-1}。如：“243”表示容量为 24000 pF，而“339”表示容量为 33×10^{-1} pF（3.3 pF）。

d. 色标法：电容器的色标法原则上与电阻器类似，其单位为皮法（pF）。

允许误差：电容器的标称容量与其实际容量之差，再除以标称值所得的百分比，就是允许误差。一般分为八个等级，如表 1-8 所示。

表 1-8　电容器允许误差等级

级别	01	02	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ
允许误差	1%	±2%	±5%	±10%	±20%	+20%～−30%	+50%～−20%	+100%～−10%

误差的标志方法一般有三种：将容量的允许误差直接标注在电容器上。用罗马数字Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ分别表示±5%，±10%，±20%。用英文字母表示误差等级，用 J、K、M、N 分别表示±5%，±10%，±20%、±30%；用 D、F、G 分别表示±0.5%、±1%、±2%；用 P、S、Z 分别表示（+100%，−20%）、（+50%，−20%）、（+80%，−20%）。

额定耐压：指在规定温度范围下，电容器正常工作时能承受的最大电压。固定式电容器的耐压系列值有：1.6、4、6.3、10、16、25、32*、40、50、63、100、125*、160、250、300*、400、450*、500、1000V 等（带*号表示只限于电解电容使用）。耐压值一般直接标在电容器上，但有些电解电容器在正极根部用色点来表示耐压等级，如 6.3V 用棕色，10 V 用红色，16 V 用灰色。电容器在使用时不允许超过这个耐压值，若超过此值，电容器就可能损坏或被击穿，甚至爆裂。

绝缘电阻：指加到电容器上的直流电压和漏电流的比值，又称漏阻。漏阻越低，漏电流越大，介质耗能越大，电容器的性能就差，寿命也越短。

② 电容器的测试。对电容器进行性能检查，应视型号和容量的不同而采取不同的方法。

a. 电解电容器的测试。对电解电容器的性能测量，最主要的是容量和漏电流的测量。对正、负极标志脱落的电容器，还应进行极性判别。用万用表测量电解电容的漏电流时，可用万用表电阻挡测电阻的方法来估测。万用表的黑表笔应接电容器的“＋”极，红表笔接电容器的“–”极，此时表针迅速向右摆动，然后慢慢退回，待指针不动时其指示的电阻值越大表示电容器的漏电流越小；若指针根本不向右摆，说明电容器内部已断路或电解质已干涸而失去容量。

用上述方法还可以鉴别电容器的正、负极。对失掉正、负极标志的电解电容器，可先假定某极为“＋”，让其与万用表的黑表笔相接，另一个电极与万用表的红表笔相接，同时观察并记住表针向右摆动的幅度；将电容放电后，把两只表笔对调重新进行上述测量。哪一次测量中，表针最后停留的摆动幅度较小，说明该次对其正、负极的假设是对的。

b. 中、小容量电容器的测试。这类电容器的特点是无正、负极之分，绝缘电阻很大，因而其漏电流很小。若用万用表的电阻挡直接测量其绝缘电阻，则表针摆动范围极小不易观察，用此法主要是检查电容器的断路情况。

对于 0.01μF 以上的电容器，必须根据容量的大小，分别选择万用表的合适量程，才能正确加以判断。如测 300μF 以上的电容器可选择“R×10 k”或“R×1k”挡；测 0.47～10μF 的电容器可用“R×1k”挡；测 0.01～0.47μF 的电容器可用“R×10k”挡等。具体方法是：用两表笔分别接触电容的两根引线（注意双手不能同时接触电容器的两极），若表针不动，将表针对调再测，仍不动说明电容器断路。

对于 0.01μF 以下的电容器不能用万用表的欧姆挡判断其是否断路，只能用其他仪表（如 Q 表）进行鉴别。

c. 可变电容器的测试。对可变电容器主要是测其是否发生碰片（短接）现象。选择万用表的电阻（R×1）挡，将表笔分别接在可变电容器的动片和定片的连接片上。旋转电容器动片至某一位置时，若发现有直通（即表针指零）现象，说明可变电容器的动片和定片之间有碰片现象，应予以排除后再使用。

2. 电容元件的伏安关系

由式（1.28）可知，当作用于电容器的电压变化时，电容器极板上的电荷也随之变化，电路中就有电荷转移，于是该电容电路中出现电流。若电压与电流取关联参考方向时，则

$$i = C\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} \tag{1.28}$$

式（1.28）为电容元件上电压与电流的伏安关系式。它表明，电容元件在任一时刻的电流不是取决于该时刻电容的电压值，而是取决于此时电压的变化率，故称电容元件为动态元件。电压变化越快，电流越大；电压变化越慢，电流越小；当电压不随时间变化时，电容电流等于零，这时电容元件相当于开路。故电容元件有隔断直流的作用。

3. 电容元件储存的电场能

电容器两极板间加上电源后，极板间产生电压，介质中建立起电场，并储存电场能量，因此，电容元件是一种储能元件。

如果电容从零电压开始充电到 $u(t)$，则在时刻 t 所储存的能量为

$$w_C = \frac{1}{2}Cu^2(t) \tag{1.29}$$

式（1.29）说明，电容元件是一种储能元件，某一时刻 t 的储能只取决于电容 C 及这一时刻电容的电压值，并与其上电压的平方成正比。当电压增大时，电容从外界吸收能量；电压减小时，电容向外界释放能量，但电容元件在任何时刻不可能释放出多于它吸收的能量，因此，它是一种无源元件。

电容在电路中主要用于调谐、滤波、隔直、交流旁路和能量转换等。

4. 电容器的串、并联

在实际工作中，经常会遇到电容器的电容量大小不合适，或电容器的额定耐压不够高等情况。为此，就需要将若干个电容器适当地加以串联、并联以满足要求。

（1）电容器的串联

图 1-35 所示电路为两个电容器串联的电路，其等效电容为：

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \tag{1.30}$$

当有几个电容串联时，其等效电容的倒数等于各串联电容的倒数之和。

（2）电容器的并联

图 1-36 所示电路为两个电容器并联的电路，其等效电容为：

$$C = C_1 + C_2 \tag{1.31}$$

当有几个电容并联时，其等效电容等于各并联电容之和。

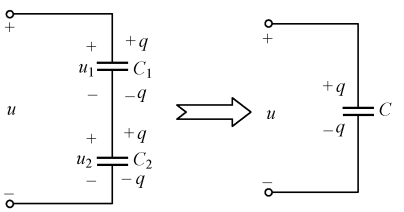


图 1-35　电容的串联

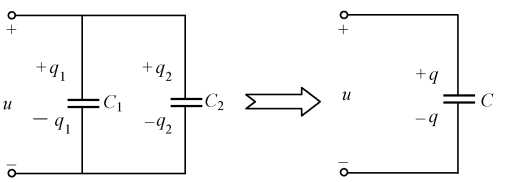


图 1-36　电容的并联



实践操作 —— 做一做

分别给出直标法、数字表示法、色标法电容器，每种 2 个，进行识别，将识别结果填入表 1-9 中。

表 1-9　电容器的识读

标　注　法	序　号	电　容　量	耐　压　值	偏　　差
直标法	电容器 1			
	电容器 2			
数字标注法	电容器 3			
	电容器 4			

续表

标　注　法	序　号	电　容　量	耐　压　值	偏　　差
色标法	电容器 5			
	电容器 6			

电容器质量的检测，用万用表对给定的 2~3 个电容器进行漏电和容量判别，将识别结果分别填入表 1-10 中。

表 1-10　固定电容器的漏电和电容容量判别

电容器	电容器漏电判别			电容器容量判别		
	万用表指针偏转的最大值	万用表指针复位的位置	质量分析	万用表指针有偏转情况	万用表指针不偏转	质量分析
电容器 1						
电容器 2						
电容器 3						

应注意：在进行固定电容器漏电判别时，用万用表电阻挡的 R×10k 量程；对 5000pF 以上的电容器进行电容容量的判别时可用万用表最高电阻挡，对 5000pF 以下的小容量电容器，用万用表的最高电阻挡已看不出充电与放电现象，应采用专门的测量仪器判别。



问题研讨 —— 想一想

电容器的标注方法有_____、_____、_____等几种，其中最常用的是_____。电解电容器的极性判断方法是_____；电风扇上启动器用的电容器是_____（电解电容器/普通电容器）。

1.2.3　电感元件及检测



知识先导 —— 认一认

观察图 1-37 所示的一些常用电感器。

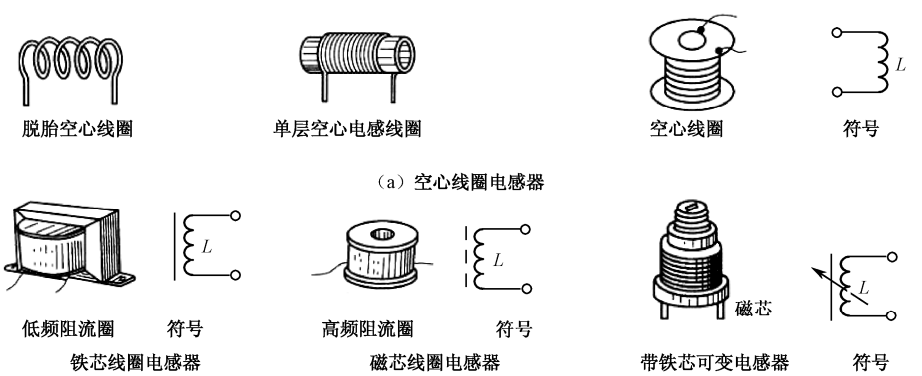


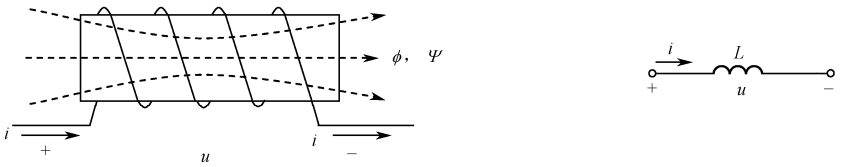
图 1-37　电感器的外形及符号

知识链接 —— 学一学

1. 电感

（1）电感元件

由物理学知识知道，有电流通过导线时，导线周围就会产生磁场。为了加强磁场，常把导线绕成线圈，如图 1-38 所示，其中磁通ϕ与电流 i 的方向总是符合右手螺旋定则的。



（a）线圈的磁通和磁链　　（b）电感元件

图 1-38　电感元件

（2）电感

当线圈中的电流变化时，它周围的磁场也要变化，变化着的磁场，在线圈中将产生感应电动势。这种感应现象称为自感应，相应的器件称为自感元件，简称自感或电感。

线圈一般是由许多线匝密绕而成，与整个线圈相交链的磁通总和称为线圈的磁链 Ψ。磁链通常是由线圈的电流产生的，当线圈中没有铁磁材料时，磁链与电流成正比，即

$$L=\frac{\Psi}{i} \tag{1.32}$$

式中，比例系数 L 称为电感元件的自感系数或电感系数，简称为电感。电感的单位为亨利，简称亨，用 H 表示，另有毫亨（mH）和微亨（μH）。

如果电感元件的电感为常数，而不随通过它的电流的改变而变化，则称为线性电感元件。本书如不特别加以说明，都是指线性电感。

电感元件和电感线圈也称为电感。所以，电感一词有时指电感元件，有时则是指电感元件或电感线圈的电感系数。

（3）电感器的参数识别与检测

① 电感器的参数识别。电感量标称值与误差：电感器的电感量也有标称值，单位有μH（微亨）、mH（毫亨）和 H（亨利）。电感量的误差是指线圈的实际电感量与标称值的差异。对振荡线圈的要求较高，允许误差为 0.2%～0.5%；对耦合阻流线圈要求则较低，一般在 10%～15%之间。电感器的标称电感量和误差的常见标志方法有直接法和色标法，标志方式类似于电阻器。目前大部分国产固定电感器将电感量、误差直接标在电感器上。

品质因数：电感器的品质因数 Q 是线圈质量的一个重要参数。它表示在某一工作频率下，线圈的感抗对其等效直流电阻的比值。Q 愈高，线圈的铜损耗愈小。在选频电路中，Q 值愈高，电路的选频特性也愈好。

额定电流：指在规定的温度下，线圈正常工作时所能承受的最大电流值。对于阻流线圈、电源滤波线圈和大功率的谐振线圈，这是一个很重要的参数。

分布电容：指电感线圈匝与匝之间、线圈与地以及屏蔽盒之间存在的寄生电容。分布电

容使 Q 值减小、稳定性变差，为此可将导线用多股线或将线圈绕成蜂房式，对天线线圈则采用间绕法，以减少分布电容的数值。

② 电感器的检测。首先进行外观检查，看线圈有无松散，引脚有无折断、生锈现象。然后用万用表的欧姆挡测线圈的直流电阻，若为无穷大，说明线圈（或与引出线间）有断路；若比正常值小很多，说明有局部短路；若为零，则线圈被完全短路。对于有金属屏蔽罩的电感器线圈，还需检查它的线圈与屏蔽罩间是否短路；对于有磁芯的可调电感器，螺纹配合要好。

2. 电感元件的伏安关系

当流过电感元件的电流变化时，其磁链也随之变化，它两端将产生感应电压。如图 1-38（b）所示，如选 u 与 i 为关联参考方向，根据电磁感应定律与楞次定律，电感元件的感应电压为：

$$u=\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}(Li)}{\mathrm{d}t}=L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \tag{1.33}$$

由式（1.33）可知，任何时刻，电感元件的电压并不取决于这一时刻电流的大小，而是与这一时刻电流的变化率成正比。当电流不随时间变化时，则电感电压为零。所以，在直流电路中，电感元件相当于短路。

当电感线圈中通入电流时，电流在线圈内及线圈周围建立起磁场，并储存磁场能量，因此，电感元件也是一种储能元件。

3. 电感元件储存的磁场能

如果电感从零电流开始充到 $i(t)$，则在时刻 t 所储存的能量为：

$$w_{\mathrm{L}}=\frac{1}{2}Li^2(t) \tag{1.34}$$

式（1.34）说明，电感元件也是一种储能元件，某一时刻 t 的储能只取决于电感 L 量及这一时刻流过的电感的电流值，并与其上电流的平方成正比。当电流增大时，电感从外界吸收能量；电流减小时，电感向外界释放能量，但电感元件在任何时刻不可能释放出多于它吸收的能量，因此，它也是一种无源元件。

电感器（简称电感）也是构成电路的基本元件，在电路中有阻碍交流电通过的特性。其基本特性是通低频、阻高频，在交流电路中常用于扼流、降压、谐振等。



实践操作 —— 做一做

电感器的识别，分别给出直标法、色标法电感器，每种 2 个，进行识别，将识别结果填入表 1-11 中。

表 1-11　电感器的识读

标 注 法	序　号	电 感 量	偏　差
直标法	电感器 1		
	电感器 2		
色标法	电感器 3		
	电感器 4		

问题研讨 —— 想一想

电感器是根据_____（电磁感应/电场强度）原理，用_____（导线/绝缘线）绕制在绝缘管或铁芯、磁芯上的一种常用的电子元件；电感器的主要参数有_____；电感的标注方法有_____。

1.2.4 电源元件

知识先导 —— 认一认

电源可分为独立电源和受控电源。独立电源元件是指能独立向电路提供电压、电流的器件、设备或装置，如日常生活中常见的干电池、蓄电池和稳压电源等。

1. 独立电源

实际电源可以用两种不同的电路模型来表示，一种以电压的形式向电路供电，称为电压源；一种以电流的形式向电路供电，称为电流源。

（1）电压源

任何一个电源，都含有电动势 E（或源电压 U_S）和内阻 R_0，在分析和计算电路时，用电源电动势 E（或 U_S）和内阻 R_0 串联的电路模型来表示，称为电压源，如图 1-39 所示。图中 U 是电源端电压，I 是流过负载的电流。

$$I=\frac{E}{R_0+R_L},\quad U=E-IR_0$$

输出电流取决于负载 R_L，端电压 U 略小于电源电动势 E，其差值为内阻 R_0 所分电压 IR_0。电压源的端电压 U 随输出电流 I 变化的曲线称为电压源的伏安特性曲线，如图 1-40 所示。

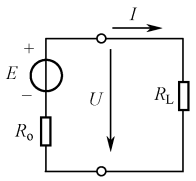


图 1-39　电压源电路

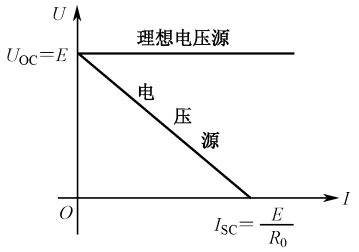


图 1-40　电压源和理想电压源的伏安特性曲线

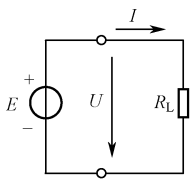


图 1-41　理想电压源电路

电压源开路时，I=0，U=E，电路中的电流为零，电源端电压等于电源电动势，U_{OC} 称为开路电压。

电压源短路时，由于外电路电阻为零（或被短路），则 U=0，I_{SC}=E/R_0，电源端电压为零，输出电流为零，电源中电流最大，I_{SC} 称为短路电流。内阻 R_0 越小，直线越平。

理想电压源就是电源内阻 R_0=0 的电压源，如图 1-41 所示。电

源输出电压 U 恒等于电源电动势 E，是一定值。而输出电流 I 是任意的，由负载电阻 R_L 及电压 U 决定，所以又称为恒压源。它的外特性为 $U=E$ 的水平线，如图 1-40 所示。如果一个电压源的内阻 $R_0<<R_L$ 负载电阻，可认为是理想电压源。通常用的稳压电源可认为理想电压源。实际电压源可看作为是理想电压源 E 与内阻 R_0 的串联。

（2）电流源

实际电源除用电源电动势 E（或 U_S）和内阻 R_0 串联的电路模型表示外，还可以用恒定电流 I_S 和内阻 R_0 并联的电路模型来表示，称为电流源，如图 1-42 所示。由图 1-42 可得：

$$\frac{U}{R_0}=\frac{E}{R_0}-I=I_S-I\ ,\quad I_S=\frac{U}{R_0}+I$$

$I_S=E/R_0$ 为电源短路电流，I 还是流过负载的电流，U 还是负载的端电压，U/R_0 是引出的另一电流。短路电流 I_S 和内阻 R_0 并联。对于负载 R_L 而言，其上电压 U 和流过电流 I 并未改变。

电流源的外特性曲线如图 1-43 所示。当电流源开路时，$I=0$，$U=I_SR_0$；当电流源短路时，$U=0$，$I=I_S$，内阻 R_0 越大，特性曲线越陡。

理想电流源就是电源内阻 $R_o\to\infty$ 时的电流源，如图 1-44 所示。理想电流源输出的电流 I 恒等于电流源电流 I_S，是一定值，而输出电压 U 是任意的，由负载电阻 R_L 及电流 I_S 决定，所以又称为恒流源，它的外特性为 $I=I_S$ 的垂直线，如图 1-43 所示。如果一个电流源的内阻 $R_o>>R_L$ 负载电阻，可认为是理想电流源。实际电流源可看作为是理想电流源 I_S 与内阻 R_0 并联。

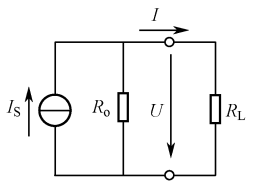


图 1-42　电流源电路

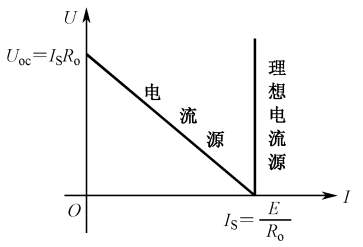


图 1-43　电流源和理想电流源的外特性曲线图

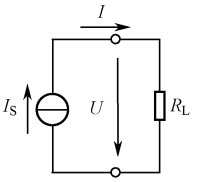


图 1-44　理想电流源电路

（3）电压源和电流源的等效变换

对照电压源模型的伏安特性曲线和电流源模型的伏安特性曲线，两者是相同的，即电压源和电流源在对同一外电路，相互间是等效的，可以等效变换。一个实际的电源可以用电压源模型（E 与 R_0 串联）等效，也可用电流源模型（I_S 与 R_0 并联）等效，如图 1-45 所示。在两种模型的 U、I 保持不变的情况下，等效变换的条件为：

$$I_S=\frac{E}{R_0}\quad 或\quad E=I_SR_0 \tag{1.35}$$

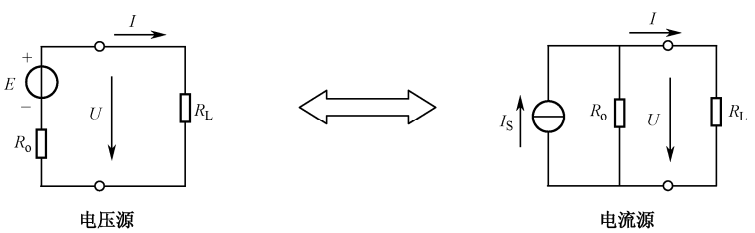


图 1-45　电压源和电流源的等效变换

等效变换时，R_0 保持不变，但接法改变。

电压源与电流源等效互换是分析复杂电路的方法之一。在进行电压源和电流源的等效变换时应注意以下几点。

① 电源互换是电路等效变换的一种方法。这种等效是电源对外电路输出电流 I、端电压 U 的等效，而对电源内部并不等效。

② 变换时两种电路模型的极性必须一致，电流源流出电流的一端与电压源的正极性端相对应（即电流源电流方向与电压源电动势方向一致）。

③ 有内阻 R_0 的实际电源，它的电压源模型与电流源模型可以互换；理想电压源与理想电流源之间不能进行等效变换。因理想电压源的电压恒定不变，电流随外电路而变；理想电流源的电流恒定不变，电压随外电路而变，不满足等效变换条件。

④ 电源互换等效方法可以推广使用，如果理想电压源 E 与电阻串联，可看为电压源；理想电流源 I_S 与电阻并联，可看为电流源。

⑤ 与恒压源并联的元件对外电路不起作用，等效变换时可以把它去掉。因为去掉后，不影响外电路对该恒压源的响应，去掉的方法是将其开路。与恒流源串联的元件对外电路毫无影响，等效变换时可以去掉，去掉的方法是将其短路。



应用举例 —— 练一练

例 1.9 求图 1-46（a）所示电路中的电流 I_1、I_2、I_3。

解 根据电源模型等效变换原理，可将图 1-46（a）依次变换为图 1-46（b）、（c）。

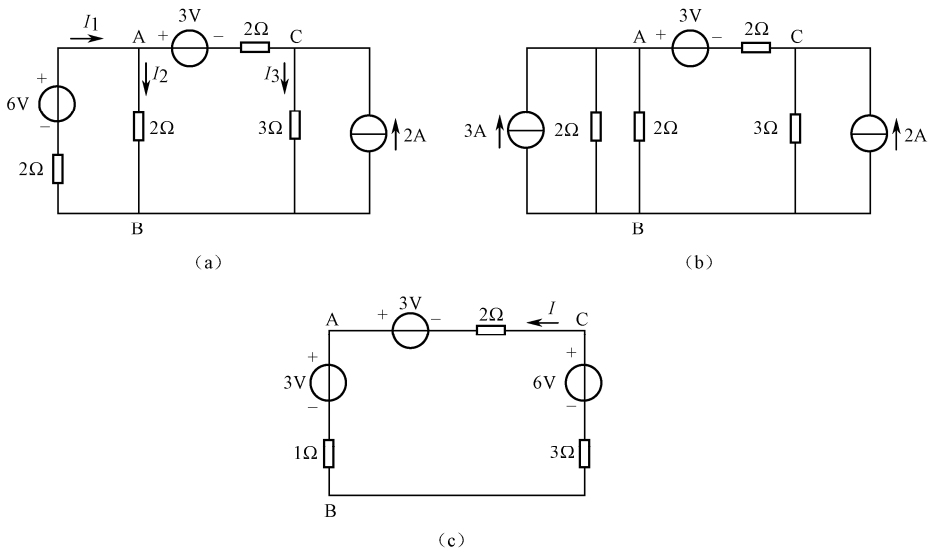


图 1-46 例 1.9 图

根据图 1-46（c）可得：

$$I=\frac{6+3-3}{3+2+1}=1\ (\mathrm{A})$$

从图 1-46（a）变换到图 1-46（c），只有 AC 支路未经变换，所以在图 1-46（a）的 AC 支

路中电流大小方向与已求出的 I 完全相同，即为 1 A，则

$$I_3=2-1=1\text{（A）}$$

为求 I_1 和 I_2，应先求出 U_{AB}。根据图 1-42（c）得：

$$U_{AB}=3+1\times1=4\text{（V）}$$

再根据图 1-46（a）得：

$$I_2=\frac{U_{AB}}{2}=\frac{4}{2}2\text{（A）}，I_1=I_2-I=2-1=1\text{（A）}$$

2. 受控源

电压源的电压或电流源的电流，受电路中其他支路电压或电流的控制，这类电源统称为受控电源，简称受控源，它是非独立电源。受控源不同于独立源，它本身不能直接起激励作用，而只是用来反映电路中某一支路电压或电流对另一支路电压或电流的控制关系。因此受控源是一种非独立源。在电路理论中，受控源主要用来描述和构成各种电子器件的模型，为电子线路的分析计算提供基础。

受控源有两对端钮：一对为输入端钮或控制端口，一对为输出端钮或受控端口。所以受控源是一个二端口元件。受控源可以是电压源，也可以是电流源；受控源的控制量可以是电压，也可以是电流。因此，受控源可以分为以下四类。

电压控制电压源（VCVS）：在图 1-47（a）中，输出电压 U_2 是受输入电压 U_1 控制的，其外特性为：

$$U_2=\mu U_1$$

式中，μ为转移电压比或电压放大系数，它没有量纲。

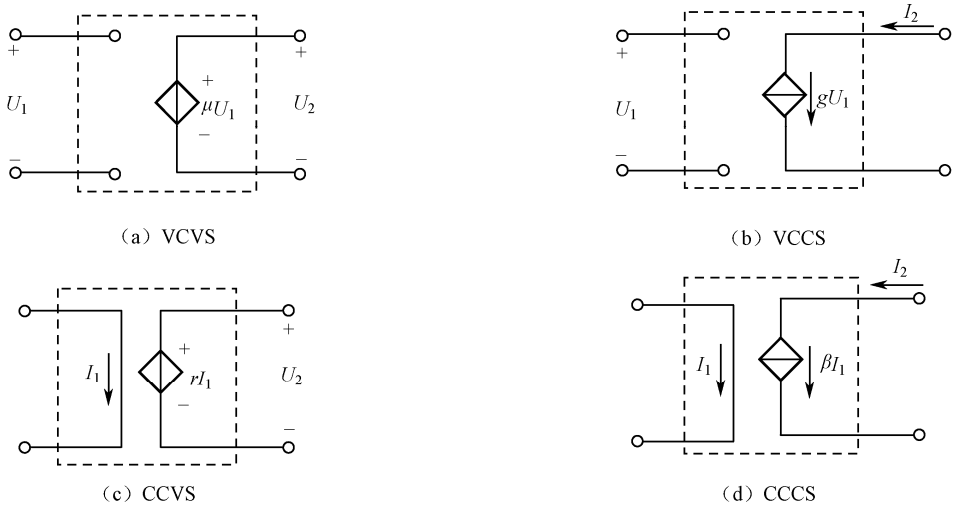


图 1-47　四种受控源模型

电压控制电流源（VCCS）：在图 1-47（b）中，输出电流 I_2 是受输入电压 U_1 控制的，其外特性为：

$$I_2=gU_1$$

式中，g 为输出电流与输入电压的比值，它具有电导的量纲，称为转移电导，其基本单位是 S。

电流控制电压源（CCVS）：在图 1-47（c）中，输出电流 U_2 是受输入电流 I_1 控制的，其外特性为

$$U_2=rI_1$$

式中，r 为输出电压与输入电流的比值，它具有电阻的量纲，称为转移电阻，其基本单位是Ω。

电流控制电流源（CCCS）：在图 1-47（d）中，输出电流 I_2 是受输入电流 I_1 控制的，其外特性为：

$$I_2=\beta I_1$$

式中，β为输出电流与输入电流的比值或电流放大系数，它没有量纲。

图 1-47 所示的是四种理想受控源。在电路图中，受控源用菱形符号表示，以便与独立电源的圆形符号相区别。受控电压源或受控电流源的参考方向的表示方法与独立源一样。

当图 1-47 中的转移系数μ、g、r、β为常数时，表明受控量与控量成正比，这种受控源称为线性受控源。



实践操作 —— 做一做

验证电压源与电流源等效变换。提示：参考图 1-48 所示电路接线，其中的内阻 R_0=51Ω，负载电阻 R=200Ω。在图 1-48（a）所示的电路中，E 用恒压源中的+6V 输出端，记录电压表、电流表的读数。然后调节图（b）电路中的恒流源 I_S，令两表的读数与图（a）的数值相等，记录 I_S 值，验证等效变换条件的正确性。

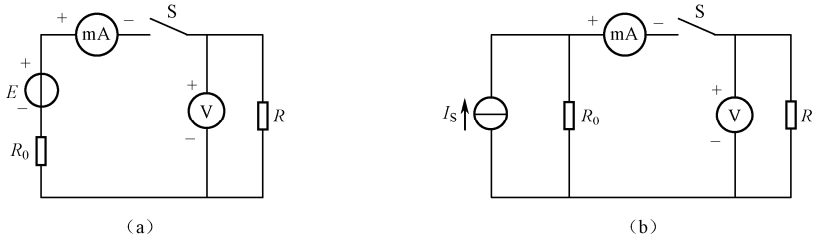


图 1-48　电路接线图



问题研讨 —— 想一想

（1）两个恒压源 U_{S1}、U_{S2} 顺向串联或反向串联时，等效恒压源的 U_S 如何计算？能否将两个恒压源并联？什么情况下可以并联？可以并联的两个恒压源等效恒压源的 U_S 为多少？

（2）两个恒流源 I_{S1}、I_{S2} 顺向并联或反向并联时，等效恒流源的 I_S 如何计算？能否将两个恒流源串联？什么情况下可以串联？可以串联的两个恒流源等效恒流源的 I_S 为多少？

任务 1.3　复杂直流电路的分析与测试



任务描述

在对由几个电源共同作用的电路分析时仅用欧姆定理不能求解复杂电路，为了求解复杂

电路，本任务学习支路电流法、节点电压法、叠加原理、戴维南定理及其应用与测试。

任务目标

理解掌握支路电流法、节点电压法、叠加原理和戴维南定理；能用支路电流法、节点电压法、叠加原理和戴维南定理求解较复杂电路；能进行复杂直流电路的连接与测试。

任务实施

1.3.1　支路电流法及应用

知识链接 —— 学一学

1. 支路电流法

以支路电流为未知量，根据基尔霍夫定律和欧姆定律列出所需的方程组，然后解出各未知电流，这就是支路电流法，简称为支路法。

以图 1-49 所示的电路为例来说明支路电流法。在这个电路中，支路数 b=6，各支路电流的参考方向如图 1-49 所示。根据数学知识，需要列出 6 个彼此独立的方程，才能解出这 6 个未知电流。如何得到所需的方程组呢？

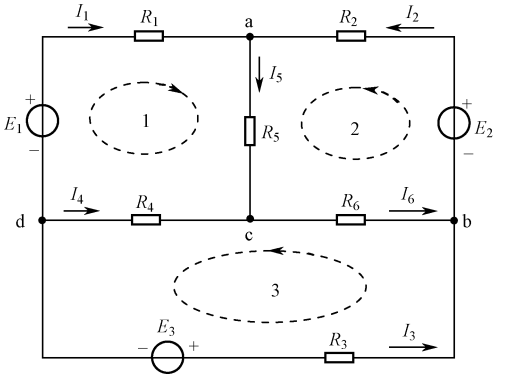


图 1-49　支路电流法举例

首先，列出电路的 KCL 方程。

在图 1-44 中，节点数 n=4，电路中的 4 个节点分别标有字母 a、b、c、d，应用 KCL，可以写出 4 个节点电流方程。

节点 a：$I_1+I_2-I_5=0$

节点 b：$-I_2+I_3+I_6=0$

节点 c：$I_4+I_5-I_6=0$

节点 d：$-I_1-I_3-I_4=0$

将上述 4 个方程相加，得恒等式 0=0，说明这 4 个方程中的任一个均可从其余三个推出。

因此，对具有 4 个节点的电路，应用电流定律只能列出 4–1=3 个独立方程。至于列方程时选哪三个节点作为独立节点，则是任意的。

一般地说，对具有 n 个节点的电路，运用基尔霍夫节点电流定律只能得到 n–1 个独立方程。

再列出电路的 KVL 方程，得到 3 个独立的电流方程后，另外 3 个独立方程可由基尔霍夫回路电压定律得到，通常取网孔列出。如按图 1-49 所标的各网孔的绕行方向，就可列出所需的 3 个电压方程。

设网孔 1 顺时针绕行，则

$$R_1I_1 + R_5I_5 - R_4I_4 = E_1$$

设网孔 2 逆时针绕行，则

$$R_2I_2 + R_5I_5 + R_6I_6 = E_2$$

设网孔 3 逆时针绕行，则

$$R_3I_3 - R_6I_6 - R_4I_4 = E_3$$

可以证明：一个电路的网孔数恰好等于 b–（n–1）。

运用基尔霍夫定律和欧姆定律一共可以列出(n–1)+[b–(n–1)]=b 个独立方程，所以能解出 b 个支路电流。

2. 支路电流法的应用

利用支路电流法，求解电路的一般步骤如下：

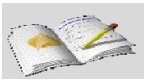
（1）确定支路数，并标注各支路电流及其参考方向。

（2）任取 n–1 个独立节点，列出 n–1 个点的 KCL 方程。

（3）选取独立回路（一般选网孔作为独立回路），并确定各独立回路的绕行方向，列出所选独立回路的 KVL 方程。

（4）将已知参数代入所列的独立方程，并联立成方程组。

（5）求解方程组，可得所需的支路电流。



应用举例 —— 练一练

例 1.10 电路如图 1-50 所示，已知 E_1=15V，E_2=10V，R_1=2Ω，R_2=4Ω，R_3=12Ω，求电路中的各支路电流。

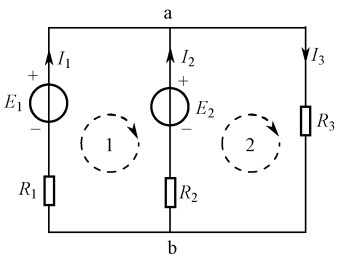


图 1-50 例 1.10 图

解

（1）假定各支路电流方向如图 1-50 所示。

（2）由于该电路只有两个节点，故只能列一个 KCL 独立方程，这里取节点 a 为独立节点，其 KCL 方程为：

节点 a：$I_1 + I_2 - I_3 = 0$

（3）选定两个网孔作为独立回路，并确定网孔 1、2 均按顺时针方向绕行，列出两个网孔的 KVL 独立方程为：

网孔 1：R_1I_1–R_2I_2=E_1–E_2

网孔 2：R_2I_2＋R_3I_3=E_2

（4）将已知参数代入已所列方程，联立成方程组：

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ 2I_1 - 4I_2 = 15 - 10 \\ 4I_2 + 12I_3 = 10 \end{cases}$$

（5）解此方程组得：

$$I_1 = 1.5\,\text{A}，\quad I_2 = -0.5\,\text{A}，\quad I_3 = 1\,\text{A}$$

其中 I_2 为负值，说明假定方向与实际方向相反。



实践操作 —— 做一做

在实验线路板上，连接图 1-51 所示电路。

（1）实验前先任意设定三条支路和三个闭合回路的电流正方向，如图 1-51 中的 I_1、I_2、I_3 的方向已设定，三个闭合回路的电流正方向可设为 ADEFA、BADCB 和 FBCEF。

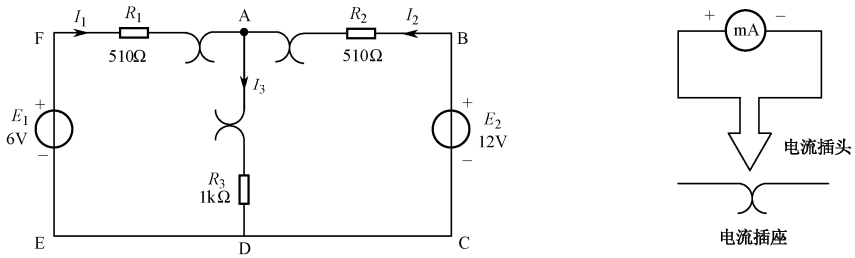


图 1-51　实验电路图

（2）分别将两路直流稳压源接入电路，令 E_1=6V，E_2=12V。

（3）熟悉电流插头的结构，将电流插头的两端接至数字毫安表的“＋、－”两端。将电流插头分别插入三条支路的三个电流插座中，读出并将电流值记入表 1-12 中。

（4）用万用表分别测量两路电源及电阻元件上的电压值，将测量数据记入表 1-12 中。

（5）根据实验数据，选定实验电路中的任一个闭合回路，验证 KVL 的正确性，并进行误差原因分析。

（6）根据图 1-51 中的电路参数，计算出待测的电流 I_1、I_2、I_3 和各电阻上的电压值，记入表 1-12 中，以便实验测量时，可正确地选定毫安表和电压表的量程。

表 1-12　基尔霍夫定律的测量数据

被　测　量	I_1/mA	I_2/mA	I_3/mA	U_{FA}/V	U_{BA}/V	U_{AD}/V	U_{FE}/V	U_{BC}/V
计算值								
测量值								
相对误差								



问题研讨 —— 想一想

（1）直流电表在什么情况下可能出现指针反偏？应如何处理？在记录数据时应注意什

么？若用直流数字毫安表进行测量时，则会有什么显示？

（2）如果电路中既含有电压源，又含有电流源，如何用支路电流法求解各支路电流或各元件两端的电压？

1.3.2 节点电压法及应用



知识链接 —— 学一学

1. 节点电压法

节点电压法是以电路的节点电压为未知量来分析电路的一种方法，它不仅适用于平面电路，同时也适用于非平面电路。鉴于这一优点，在计算机辅助电路分析中，一般也采用节点电压法求解电路。

在电路的 n 个节点中，任选一个为参考点，把其余（n–1）个节点对参考点的电压称为该节点的节点电压。电路中所有支路电压都可以用节点电压来表示。电路中的支路分成两种：一种接在独立节点和参考节点之间，它的支路电压就是节点电压；另一种接在各独立节点之间，它的支路电压则是两个节点电压之差。

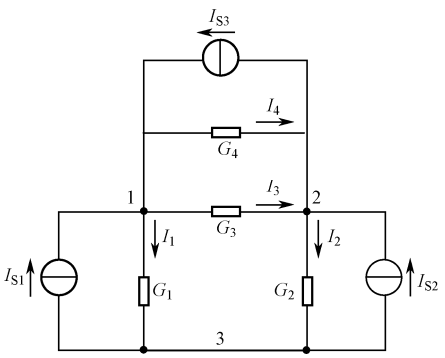


图 1-52　节点电压法举例

如能求出各节点电压，就能求出各支路电压及其他待求量。要求（n–1）个节点电压，需（n–1）个独立方程。用节点电压代替支路电压，已满足 KVL 的约束，只需列 KCL 的约束方程即可，而所能列出的独立的 KCL 方程正好是（n–1）个。

以图 1-52 为例，独立节点数为：n–1=2。选取各支路电流的参考方向，如图所示，对节点 1、2 分别由 KCL 列出节点电流方程为：

$$\left.\begin{aligned} -I_1 - I_3 - I_4 + I_{S1} + I_{S3} = 0 \\ -I_2 + I_3 + I_4 + I_{S2} - I_{S3} = 0 \end{aligned}\right\}$$

设以节点 3 为参考点，则节点 1、2 的节点电压分别为 U_1、U_2。

将支路电流用节点电压表示为：

$$\left.\begin{aligned} I_1 &= G_1 U_1 \\ I_2 &= G_2 U_2 \\ I_3 &= G_3 U_{12} = G_3(U_1 - U_2) = G_3 U_1 - G_3 U_2 \\ I_4 &= G_4 U_{12} = G_4(U_1 - U_2) = G_4 U_1 - G_4 U_2 \end{aligned}\right\}$$

代入两个节点电流方程中，经移项整理后得：

$$\left.\begin{aligned} (G_1 + G_3 + G_4)U_1 - (G_3 + G_4)U_2 &= I_{S1} + I_{S3} \\ -(G_3 + G_4)U_1 + (G_2 + G_3 + G_4)U_2 &= I_{S2} - I_{S3} \end{aligned}\right\} \tag{1.36}$$

式（1.36）就是图 1-52 所示的电路以节点电压 U_1、U_2 为未知量列出的节点电压方程，简称为节点方程。

将式（1.36）写成：

$$\left.\begin{aligned} G_{11}U_1+G_{12}U_2&=I_{S11}\\ G_{21}U_1+G_{22}U_2&=I_{S22}\end{aligned}\right\} \tag{1.37}$$

这就是当电路具有三个节点时电路的节点方程的一般形式。式（1.37）中的左边 $G_{11}=(G_1+G_2+G_3)$、$G_{22}=(G_2+G_3+G_4)$分别是节点 1、节点 2 相连接的各支路电导之和，称为各节点的自电导，自电导总是正的。$G_{12}=G_{21}=-(G_3+G_4)$是连接在节点 1 与节点 2 之间的各公共支路的电导之和的负值，称为两相邻节点的互电导，互电导总是负的。式（1.37）右边 $I_{S11}=(I_{S1}+I_{S3})$、$I_{S22}=(I_{S2}-I_{S3})$分别是流入节点 1 和节点 2 的各电流源电流的代数和，称为节点电源电流，流入节点的取正号，流出的取负号。

上述关系可推广到一般电路，对具有 n 个节点的电路，其节点方程为：

$$\left.\begin{aligned} &G_{11}U_1+G_{12}U_2\cdots+G_{1(n-1)}U_{n-1}=I_{S11}\\ &G_{21}U_1+G_{22}U_2\cdots+G_{2(n-1)}U_{n-1}=I_{S22}\\ &\vdots\\ &G_{(n-1)1}U_1+G_{(n-1)2}U_2\cdots+G_{(n-1)(n-1)}U_{n-1}=I_{S(n-1)(n-1)}\end{aligned}\right\} \tag{1.38}$$

当电路中含有电压源支路时，可以采用以下措施：

（1）尽可能取电压源支路的负极性端作为参考点。

（2）把电压源中的电流作为变量列入节点方程，并将其电压与两端节点电压的关系作为补充方程一并求解。

2. 节点电压法的应用

（1）在电路中任意选某一节点为参考点，则其余节点与参考点间的电压就是独立的节点电压，因此有（n–1）个独立节点。

（2）对（n–1）个独立节点，以节点电压为未知量，列写节点电压方程。

（3）将已知参数代入所列节点电压方程，并联立成方程组，求解节点电压方程组。

（4）根据节点电压求各支路电流。

3. 弥尔曼定理

对于只有一个独立节点的电路，如图 1-53 所示的电路，可用节点电压法直接求出独立节点的电压。

可得节点电压的表达式为：

$$U_{10}=\frac{\dfrac{U_{S1}}{R_1}-\dfrac{U_{S2}}{R_2}+I_S}{\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_2}+\dfrac{1}{R_4}}=\frac{\sum G_kU_{Sk}+\sum I_{Sk}}{\sum G_k} \tag{1.39}$$

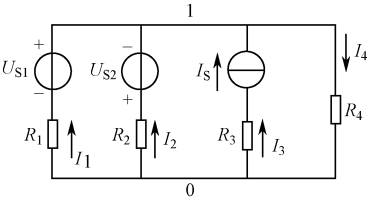


图 1-53　只有一个独立节点的电路

式（1.39）称为弥尔曼定理。$\sum G_kU_{Sk}+\sum I_{Sk}=\dfrac{U_{S1}}{R_1}-\dfrac{U_{S2}}{R_2}+I_S$，为节点电流的代数和。方向流向节点 1 的，电流为正；从节点 1 流出的，电流为负。恒流源支路电流等于此恒流源的电流，且流向节点 1 的为正；从节点 1 流出的为负，而恒流源支路的电阻对节点电压 U_{10} 不起作用，在公式中不出现。ΣG_k 为各支路电导的和，恒为正值，但要去除含恒流源支路的

电导。

应用举例 —— 练一练

例 1.11 试用节点电压法求图 1-54 所示电路中的各支路电流。

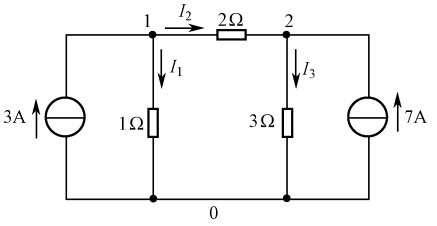


图 1-54 例 1.11 图

解 取节点 0 为参考节点，节点 1、2 的节点电压为 U_1、U_2，根据式（1.37）得：

$$\begin{cases}\left(\dfrac{1}{1}+\dfrac{1}{2}\right)U_1-\dfrac{1}{2}U_2=3\\ -\dfrac{1}{2}U_1+\left(\dfrac{1}{2}+\dfrac{1}{3}\right)U_2=7\end{cases}$$

解之得：U_1=6V，U_2=12V。

取各支路电流的参考方向，如图 1-54 所示。根据支路电流与节点电压的关系有：

$$I_1=\frac{U_1}{1}=\frac{6}{1}=6(\text{A})$$

$$I_2=\frac{U_1-U_2}{2}=\frac{6-12}{2}=-3(\text{A})$$

$$I_3=\frac{U_2}{3}=\frac{12}{3}=4(\text{A})$$

例 1.12 应用弥尔曼定理求图 1-55 所示电路中的各支路电流。

解 本电路只有一个独立节点，设节点 1 的电压为 U_1，由式（1.39）得

$$U_{10}=\frac{\dfrac{20}{5}+\dfrac{10}{10}}{\dfrac{1}{5}+\dfrac{1}{20}+\dfrac{1}{10}}=14.3\ (\text{V})$$

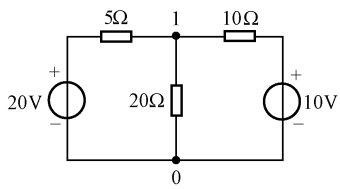


图 1-55 例 1.12 图

设各支路电流 I_1、I_2、I_3 的参考方向如图中所示，求得各支路电流为：

$$I_1=\frac{20-U_1}{5}=\frac{20-14.3}{5}=1.14\ (\text{A})$$

$$I_2=\frac{U_1}{20}=\frac{14.3}{20}=0.72\ (\text{A})$$

$$I_3=\frac{10-U_1}{10}=\frac{10-14.3}{10}=-0.43\ (\text{A})$$

实践操作 —— 做一做

接图 1-51 所示电路接线，改变 E_2 的极性，用数字直流电压表测量电压 U_{AD}，当 E_1=6V 时，调节 E_2 从 0 逐渐增大，U_{AD} 的大小会随之改变，当 E_2 达到某一值时，U_{AD} 的方向会改变，请从理论上分析其原因。



问题研讨 —— 想一想

如果电路中含有理想电压支路，如何列写节点电压方程？

1.3.3　叠加原理及应用



知识链接 —— 学一学

1. 叠加原理

叠加原理是线性电路的一个重要原理，它反映出线性电路中各激励作用独立性的基本性质。叠加原理可叙述为：在线性电路中，所有独立源共同作用产生的响应（电流、电压），等于各独立源单独作用产生响应（电流、电压）的代数和。对不作用的独立源以零值处理，即恒压源短路、恒流源开路，但内阻保留。

下面通过图 1-56（a）中 R_2 支路电流 I 为例说明叠加原理在线性电路中的体现。

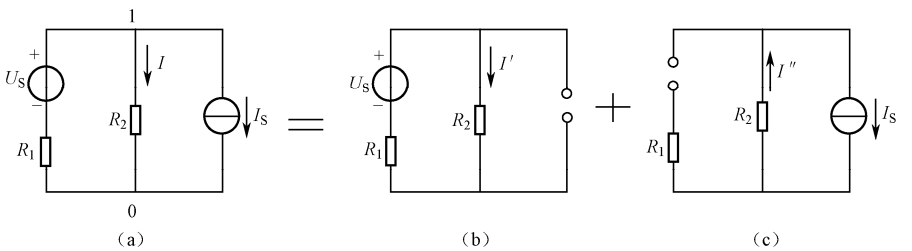


图 1-56　叠加原理举例

图 1-56（a）是一个含有两个独立源的线性电路，根据弥尔曼定理，可得电路两个节点间的电压为：

$$U_{10}=\frac{\dfrac{U_S}{R_1}-I_S}{\dfrac{1}{R_1}+\dfrac{1}{R_2}}=\frac{R_2U_S-R_1R_2I_S}{R_1+R_2}$$

R_2 支路电流为：

$$I=\frac{U_{10}}{R_2}=\frac{U_s-R_1I_S}{R_1+R_2}=\frac{U_S}{R_1+R_2}-\frac{R_1}{R_1+R_2}I_S$$

图 1-56（b）是电压源 U_S 单独作用下的情况，此情况下电流源作用为零，零电流源相当于无限大电阻（即开路）。U_S 单独作用下 R_2 支路电流为：

$$I'=\frac{U_S}{R_1+R_2}$$

图 1-56（c）是电流源 I_S 单独作用下的情况。此情况下电压源作用为零，零电压源相当于零电阻（即短路）。I_S 单独作用下 R_2 支路电流为：

$$I'' = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I_S$$

所有独立源作用下，R_2 支路电流的代数和为：

$$I = I' - I'' = \frac{U_S}{R_1 + R_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} I_S$$

对 I' 取正号，是因为它的参考方向选择得与 I 的参考方向一致；对 I'' 取负号，是因为它的参考方向选择得与 I 的参考方向相反。

应用叠加原理分析电路时应注意以下几点。

（1）叠加原理适用于多电源的线性电路，分成多个单电源电路，使分析大为简化。

（2）要注意电压、电流的参考方向。若各电源单独作用时的电压、电流方向与原电路中的电压、电流方向一致，则取正号；若相反取负号。

（3）电功率和电能量的计算不能应用叠加原理，因为它们和电流（电压）之间不是线性关系，而是平方关系。

（4）电路中存在受控源时，受控源不能按独立源处理。独立源可以单独作用，受控源在叠加过程中一般应保留在电路中，注意到其控制关系即可，然后将计算结果叠加。

（5）根据具体电路，各独立源也可以分批作用。

（6）某电源单独作用时，其他电源均应按零值处理。零值恒压源相当于短路，而零值恒流源相当于开路。但保留其内阻。

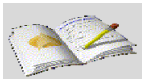
2. 叠加原理的应用

运用叠加原理解题和分析电路的基本步骤如下：

（1）分解电路：将多个独立源共同作用的电路分解成一个（或几个）独立源作用的分电路，每一个分电路中，不作用的电源按“零值”处理，并将待求的电压、电流的正方向在原电路、分电路中标出。

（2）单独求解每一分电路：分电路往往是比较简单的电路，有时可由电阻的连接及基本定律直接求解。

（3）叠加：原电路中待求的电压、电流等各分电路中对应求出的量的代数和。



应用举例 —— 练一练

例 1.14 在图 1-57（a）所示的桥形电路中，已知：R_1=2Ω，R_2=1Ω，R_3=3 Ω，R_4=0.5Ω，U_S=4.5V，I_S=1A。试用叠加原理求电压源的电流 I 和电流源的端电压 U。

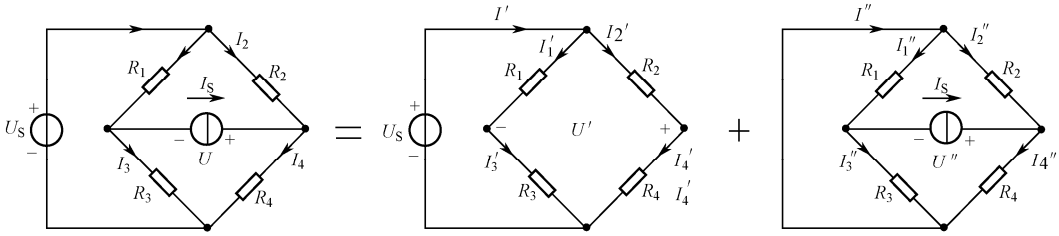


图 1-57　例 1.13 图

解　（1）当电压源单独作用时，电流源开路，如图 1-57（b）所示，各支路电流分别为：

$$I_1' = I_3' = \frac{U_S}{R_1 + R_3} = \frac{4.5}{2+3} = 0.9(\text{A})$$

$$I_2' = I_4' = \frac{U_S}{R_2 + R_4} = \frac{4.5}{1+0.5} = 3(\text{A})$$

$$I' = I_1' + I_2' = 0.9 + 3 = 3.9(\text{A})$$

电流源支路的端电压 U' 为：

$$U' = R_4 I_4' - R_3 I_3' = 0.5 \times 3 - 3 \times 0.9 = -1.2(\text{V})$$

（2）当电流源单独作用时，电压源短路，如图 1-57（c）所示，则各支路电流为：

$$I_1'' = \frac{R_3}{R_1 + R_3} I_S = \frac{3}{2+3} \times 1 = 0.6(\text{A})$$

$$I_2'' = \frac{R_4}{R_2 + R_4} I_s = \frac{0.5}{1+0.5} \times 1 = 0.333(\text{A})$$

$$I'' = I_1'' - I_2'' = 0.6 - 0.333 = 0.267(\text{A})$$

电流源的端电压 U'' 为：

$$U'' = R_1 I_1'' + R_2 I_2'' = 2 \times 0.6 + 1 \times 0.333 = 1.5333(\text{V})$$

（3）两个独立源共同作用时，电压源的电流为：

$$I = I' + I'' = 3.9 + 0.267 = 4.167(\text{A})$$

电流源的端电压为：

$$U = U' + U'' = -1.2 + 1.5333 = 0.333(\text{V})$$



实践操作 —— 做一做

按图 1-58 所示电路连接线路。

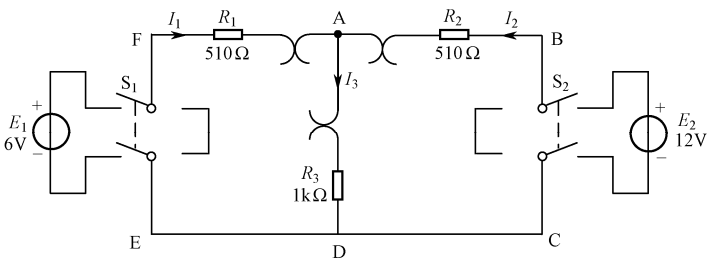


图 1-58　验证叠加原理电路

（1）令 E_1 电源单独作用，用万用表和毫安表（接电流插头）测量各支路电流及各电阻元件两端电压，数据记入表 1-13 中。

（2）令 E_2 电源单独作用，重复上述的测量，将测量数据记入表 1-13 中。

（2）令 E_1 和 E_2 共同作用，重复上述的测量，将测量数据记入表 1-13 中。

表 1-13　叠加原理的测量数据

被测量	I_1/mA	I_2/mA	I_3/mA	U_{FA}/V	U_{BA}/V	U_{AD}/V
E_1 单独作用						
E_2 单独作用						
所测量的代数和						
E_1、E_2 共同作用						



问题研讨 —— 想一想

（1）叠加原理中各电源分别单独作用，在实验中应如何操作？可否直接将不作用的电源置零（短接）？

（2）各电阻器所消耗的功率能否用叠加原理计算得出？为什么？试用上述实验数据，进行计算并得出结论。

1.3.4　戴维南定理及应用



知识链接 —— 学一学

1. 戴维南定理

支路电流法、节点电压法和叠加原理都可以计算出电路的全部响应，但在实际工作中，经常只需计算某一负载中的响应，这时应用戴维南定理具有特殊的优越性。

把一个电路或网络（网络通常指较为复杂的电路）所要计算响应的支路断开，剩余部分是一个含有电源，只有两个端子的网络，即有源二端网络。对所需要计算的这条支路来说，有源二端网络相当于一个电源。戴维南定理给出了有源二端网络等效电路的一般性结论，为确定等效电压源的参数（E'和 R_0'）提供了简明的解析方法和实验方法，它是线性电路中又一重要定理。

戴维南定理可表述为：任何一个线性有源二端网络，都可以用一个等效电压源代替。等效电压源的电动势（E'）等于有源二端网络的开路电压 U_{OC}，内阻 R_0'等于除源网络（即有源二端网络中电源均为零时），即无源二端网络的等效电阻 R_0。

等效电压源的内阻计算方法有以下三种：

（1）设有源二端网络内所有电源为零，即成为无源二端网络，用电阻串联、并联和混联或三角形连接与星形连接等效变换进行化简，计算二端网络端口处的等效电阻。

（2）设网络内所有电源为零，在有源二端网络端口处施加一电压 U，计算或测量输入端口的电流 I，则等效电阻 $R_0'=U/I$。

（3）用实验方法测量或用计算方法求得有源二端网络开路电压 U_{OC} 和短路电流 I_{SC}，则等效电阻 $R=U_{OC}/I_{SC}$（注意：此时有源网络内所有独立源和受控源均保留不变）。

2. 戴维南定理的应用

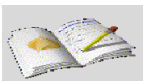
应用戴维南定理解题步骤如下：

（1）将电路分为待求支路和有源二端网络两部分。

（2）将待求支路断开，求有源二端网络的等效电压源，即求 E'和 R_0'。

（3）将待求支路接入由 E'和 R_0' 构成的等效电压源中，求待求支路的电流。

在应用戴维南定理时**应注意：**求 E'和 R_0' 时，均不考虑被断开的待求支路的影响。注意 U_{OC} 的正负以确定E'的方向；有源二端网络和所求支路之间不应有受控源或磁耦合等联系，即负载支路的性质和变化不影响 E'和 R_0' 的值。



应用举例 —— 练一练

例 1.14　在图 1-59（a）所示的电路中，已知 E_1=6V，E_2=1.5V，R_1=0.6Ω，R_2=0.3Ω，R_3=9.8Ω，求通过电阻 R_3 的电流。

解　将电路分成有源二端网络和待求支路两部分，其有源二端网络如图 1-59（b）所示，由此图可求得

$$U_{OC(AB)}=E_1-\frac{E_1-E_2}{R_1+R_2}R_1=6-\frac{6-1.5}{0.6+0.3}\times 0.6=3\ (\mathrm{V})$$

即 $E'=U_{OC(AB)}=3\mathrm{V}$

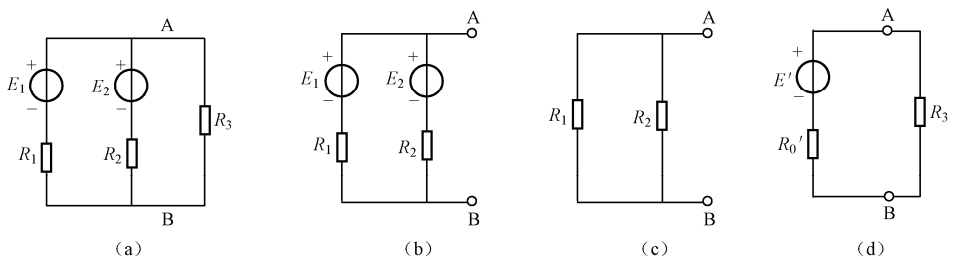


图 1-59　例 1.14 图

将有源二端网络中的电源按零值处理，得无源二端网络，如图 1-59（c）所示，由此图可求得

$$R_0'=R_1/\!/R_2=0.6/\!/0.3=0.2\ (\Omega)$$

将待求支路 R_3 支路接入所求得的等效电压源，如图 1-59（d）所示，则可求得通过 R_3 的电流

$$I_{R3}=\frac{E'}{R_0'+R_3}=\frac{3}{0.2+9.8}=0.3\ (\mathrm{A})$$

例 1.15　如图 1-60（a）所示的电路，已知 E=48V，R_1=12Ω，R_2=24Ω，R_3=36Ω，R_4=12Ω，R_5=33Ω，求通过 R_5 的电流。

解　将电路分成有源二端网络和待求支路两部分，其有源二端网络如图 1-60（b）所示，由此图可求得：

$$U_{OC(AB)}=-\frac{E}{R_1+R_2}R_1+\frac{E}{R_3+R_4}R_3=-\frac{48}{12+24}\times 12+\frac{48}{36+12}\times 36=20\ (\mathrm{V})$$

即 $E'=U_{OC(AB)}=20\mathrm{V}$

将有源二端网络中的电源按零值处理，得无源二端网络，如图 1-60（c）所示，由此图可求得：

$$R_0'=R_1 /\!/ R_2+ R_3 /\!/ R_4=12 /\!/ 24+36 /\!/ 12=17（\Omega）$$

将待求支路 R_5 支路接入所求得的等效电压源，如图 1-60（d）所示，则可求得通过 R_5 的电流

$$I_{R_5}=\frac{E'}{R_o'+R_5}=\frac{20}{17+33}=0.4\ （\mathrm{A}）$$

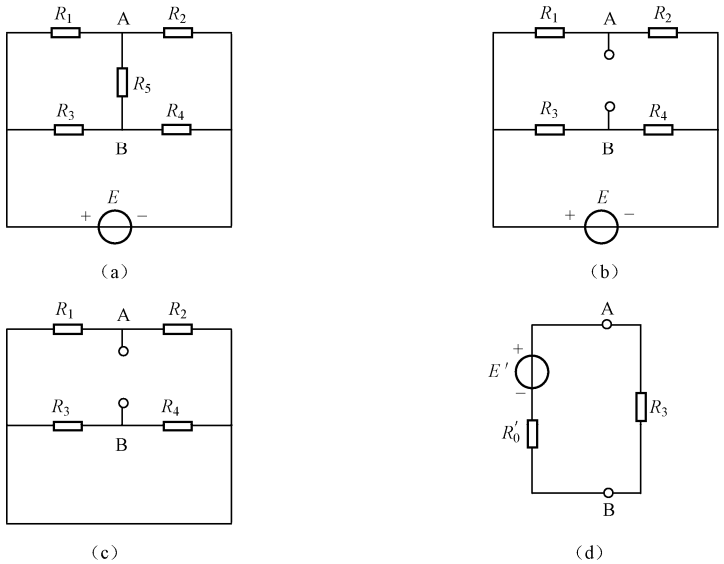


图 1-60　例 1.15 图



实践操作 —— 做一做

按图 1-59（a）连接电路，令 E_1=6V，E_2=12V，R_1=510Ω，R_2=510Ω，R_3=1kΩ。

（1）将电流表串接到 R_3 支路，测量通过 R_3 的电流，将数据记入表 1-14 中。

（2）选择万用表直流电压挡的合适量程，断开 R_3 支路，如图 1-59（b）所示，测量 A、B 间的开路电压值，将数据记入表 1-14 中。

（3）测量有源二端网络的短路电流，求得等效电阻 R_0'。

（4）将待求支路（R_3）支路接到所求得的等效电压源上，再用电流表测量 R_3 支路的电流，将数据记入表 1-14 中。

表 1-14　戴维南定理的测量数据

被测量	I_3	$U_{OC(AB)}$	$I_{SC(AB)}$	$R_0=U_{OC(AB)}/I_{SC(AB)}$	I_3
测量值					



问题研讨 —— 想一想

（1）在求戴维南等效电路时，做短路实验，测 I_{SC} 的条件是什么？在本实验中可否直接做负载短路实验？

（2）测量有源二端网络开路电压及等效内阻的方法有哪几种？各有何优缺点？

项目小结

1. 电路通常由电源、负载、中间环节三部分组成，主要作用是传输和变换电能与传递和处理信号。实际电路可用由理想电器元件组成的电路模型表示。

2. 电路中的主要物理量是电压、电流、电位、电动势、功率和能量，要了解它们的定义，掌握它们的单位。

3. 在分析电路时，必须首先标出电流、电压的参考方向。在参考方向下进行电路分析计算，若求得的为正值，表明实际方向与参考方向一致；若求得的为负值，表明实际方向与参考方向相反。

在电压、电流选取关联参考方向时，$P=UI$。当 $P=UI>0$ 时，元件吸收功率；当 $P=UI<0$ 时，元件发出功率。

4. 要确定电路中任意一点的电位，必须先选取电位参考点，任意一点的电位就是该点到参考点的电压。参考点选得不同，各点电位也不同，但两点间的电位差（电压）不变。

5. 基尔霍夫定律是电路的基本定律。基尔霍夫电流定律：$\Sigma I=0$，既适应于节点还可推广到闭合面；基尔霍夫电压定律：$\Sigma U=0$ 或 $\Sigma E=\Sigma IR$，既适应于闭合回路还可推广到开口回路，运用两定律时要注意正、负号。

6. 等效变换

（1）n 个电阻串联的等效电阻为：$R=\sum_{i=1}^{n}R_i$。分压公式为：$U_i=\dfrac{R_i}{R}U$。

（2）n 个电阻并联的等效电阻：$\dfrac{1}{R}=\sum_{i=1}^{n}\dfrac{1}{R_i}$ 或 $G=\sum_{i=1}^{n}G_i$。

两电阻并联时的分流公式为：$I_1=\dfrac{R_2}{R_1+R_2}I$，$I_2=\dfrac{R_1}{R_1+R_2}I$。

（3）△-Y 电阻网络的等效变换。

$$R_Y=\frac{\text{△形连接相邻两电阻的乘积}}{\text{△形连接所有电阻之和}}$$

$$R_\triangle=\frac{\text{Y形连接电阻两两乘积之和}}{\text{Y形连接对面的电阻}}$$

三个电阻相等时，$R_Y=\dfrac{1}{3}R_\triangle$ 或 $R_\triangle=3R_Y$。

（4）电源可用两种等效电路表示。电压源用电源电动势 E 与内阻 R_0 串联的电路模型表示；电流源用恒定电流 I_S 与内阻 R_0 并联的电路模型表示。理想电压源是内阻 $R_0=0$ 的电压源，输出恒定的电压 E，输出电流随负载而变；理想电流源输出恒定的电流 I_S，输出电压随负载而变。

在分析复杂电路时，对外电路而言实际电压源与电流源可以相互转换，转换公式为 $I_S=E/R_0$，R_0 的大小不变，只是连接位置改变。

7. 网络方程法

（1）支路电流法：支路电流法以 b 个支路的电流为未知数，列（n–1）个节点电流方程，用支路电流表示电阻电压，列 b–（n–1）个网孔回路电压方程，共列 b 个方程。

（2）节点电压法：节点电压法以（n–1）个节点电压为未知数，用节点电压表示支路电压、支路电流，列（n–1）个节点电流方程联立求解。

8. 网络定理

（1）叠加原理适用于线性电路的电压和电流的计算。依据叠加原理可将多个电源共同作用的复杂电路，分解为各个电源单独作用的简单电路，在各分解图中分别计算，最后代数和相加求出结果。注意电压源不作用时视为短路，电流源不作用时视为开路，而电源内阻必须保留。

（2）戴维南定理适用于求解线性含源二端网络中某一支路的电流。戴维南定理将一个有源二端线性网络等效为一个电压源，等效电压源的源电压 E'等于有源二端网络开路时的开路电压 U_{OC}，即 $E'=U_{OC}$；等效电压源的内阻 R_0'等于有源二端网络除去各电源（E 短路，I_S 开路）后的等效电阻。

习　　题

1.1　在图 1-61 所示的电路中，图（a）中 $U_{ab}=-5$V，试问 a、b 两点哪点电位高？在图（b）中 $U_1=-6$V，$U_2=4$V，试问 U_{ab} 等于多少伏？

1.2　一只 110V、100W 的电灯与另一只 110V、40W 的电灯串联后，试问可以接到电压为 220V 的电源供电线路上吗？

1.3　一个正在工作的负载，如果因为某种事故而使其接通到电源的两条导线发生短路，试问会产生什么后果？如果熔断器没有熔断，负载会被烧毁吗？

1.4　在图 1-62 所示的电路中，方框表示电流或负载，若各电压、电流的参考方向如图 1-62 所示，并知 $I_1=2$A，$I_2=1$A，$I_3=-1$A，$U_1=1$V，$U_2=-3$V，$U_3=8$V，$U_4=-4$V，$U_5=7$V，$U_6=-3$V。

（1）试标出各电流的实际方向和各电压的实际极性；

（2）判断哪些元件是电源？哪些是负载？

（3）计算各元件的功率，电源发出的功率和负载取用的功率是否平衡。

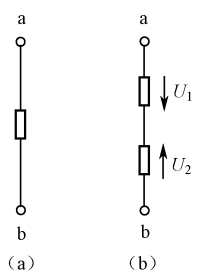


图 1-61

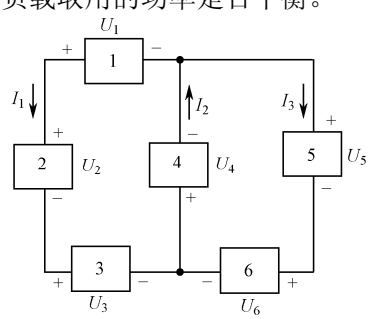


图 1-62

1.5　某楼内有 100W、220V 的灯泡 100 只，平均每天使用 3h，计算每月消耗多少电能（一

个月按 30 天计算）？

1.6　在图 1-63 所示的电路中，已知各支路的电流 I、电阻 R 和电动势 E，试写出各支路电压 U 的表达式。

1.7　在图 1-64 所示的电路中，当开关 S 闭合时，V_A=？U_{AB}=？当 S 断开时 V_A=？U_{AB}=？

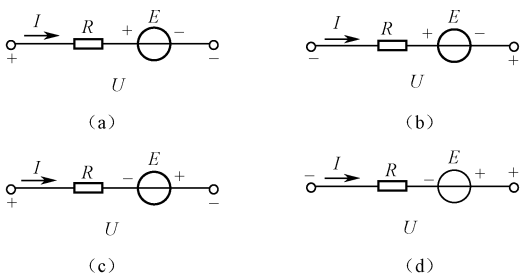


图 1-63

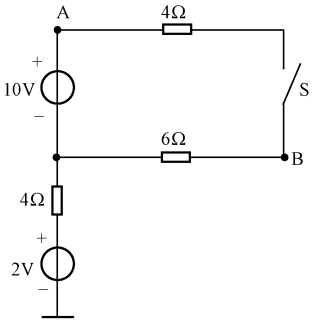


图 1-64

1.8　已知电源电动势 E=6V，接入负载电阻 R_L=2.9Ω时，测得电流 I_L= 2A；再将负载电阻改变为 R_2=5.9Ω时，试求电源的内阻 R_0 和负载电阻为 R_2 时的电流 I_2 。

1.9　试求图 1-65 所示电路中的未知电流 I_1 和 I_2。

1.10　试求图 1-66 所示电路中的 I_a、I_b、I_c。

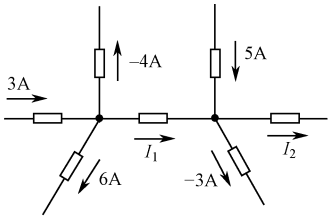


图 1-65

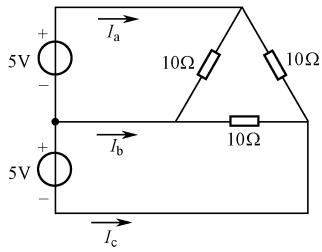


图 1-66

1.11　求图 1-67 所示电路中的 U_{ab}。

1.12　求图 1-68 所示电路中的 U_{CD}、U_{AB}。

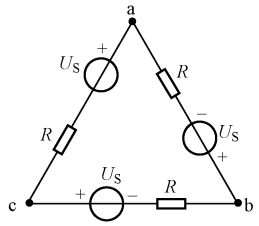


图 1-67

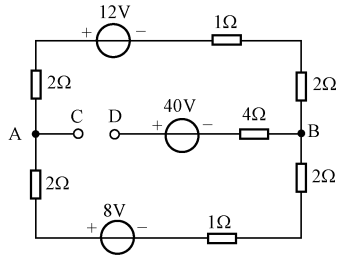


图 1-68

1.13　现有一只电表，已知表头电流为 50μA，内阻为 3kΩ。问应串联多大电阻才能改装成量程为 10V 的电压表？

1.14　计算图 1-69 各电路中的未知电压 U 或电阻 R。

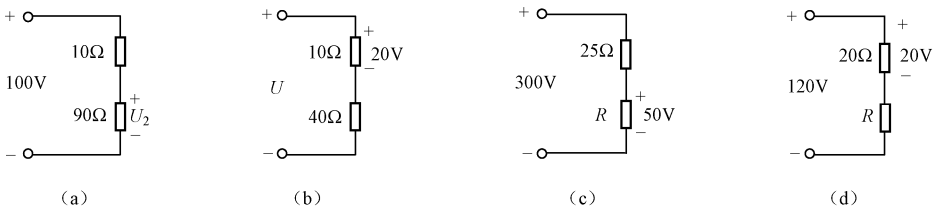


图 1-69

1.15　两个电阻串联时的等效电阻为 180Ω，并联时的等效电阻为 40Ω，问这两个电阻各是多少欧姆？

1.16　计算图 1-70 所示电路中的等效电阻 R_{ab}。

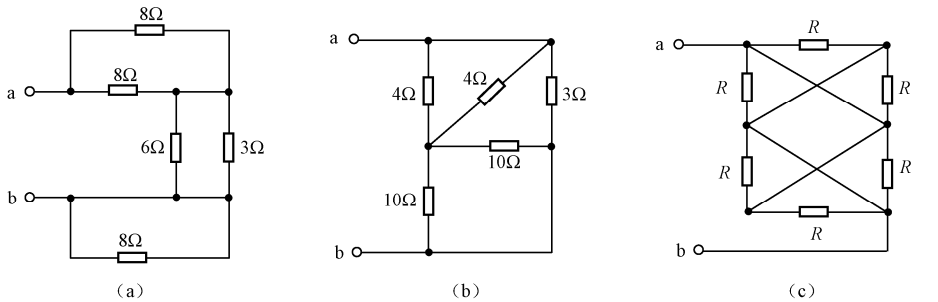


图 1-70

1.17　将图 1-71 中的图（a）等效变换为三角形网络，将图（b）等效变换为星形网络。

1.18　求图 1-72 所示电路中 4Ω电阻的电流。

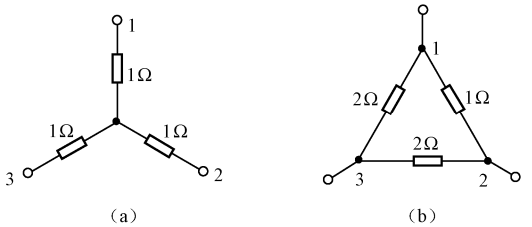


图 1-71

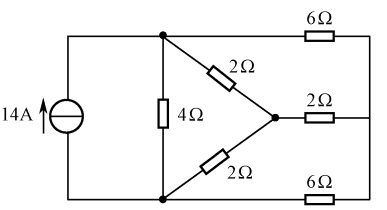


图 1-72

1.19　求图 1-73 所示电路中的电流 I。

1.20　在图 1-74 所示的电路中，已知：R_1=10Ω，R_2=30Ω，R_3=22Ω,，R_4=4Ω,，R_5=60Ω，U_S=22V，求电流 I。

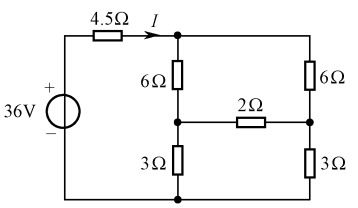


图 1-73

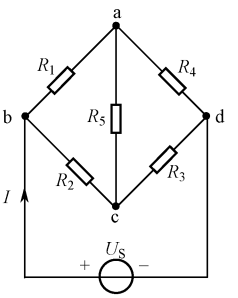


图 1-74

1.21　化简图 1-75 所示的各电路。

1.22　试等效化简图 1-76 所示的网络。

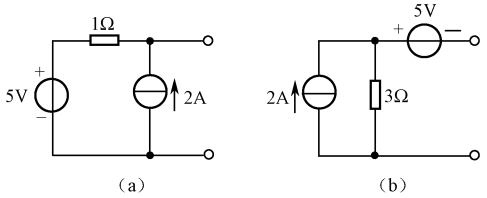


图 1-75

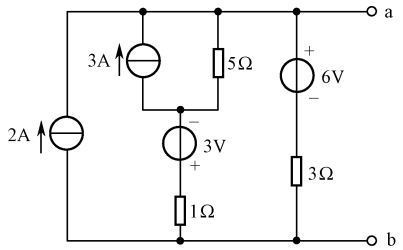


图 1-76

1.23　在图 1-77 所示的电路中，试用电源等效变换方法计算图 1-77（a）中的电压 U 及图 1-77（b）中的电流 I。

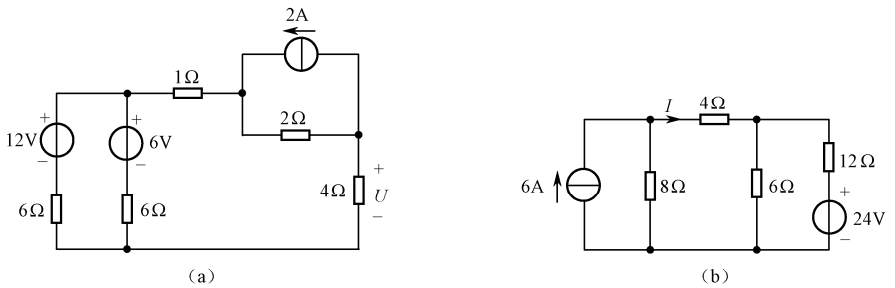


图 1-77

1.24　图 1-78 所示的电路中有多少支路？在图上标明支路电流，并选定参考方向，然后列出求解各支路电流所需的全部方程。

1.25　图 1-79 所示的电路中，已知 E_1=15V，E_2=10V，R_1=18Ω，R_2=4Ω，R_3=4Ω，求各支路的电流。

1.26　图 1-80 所示的电路中，已知 E=12V，I_S=2A，R_1=2Ω，R_2=2Ω，R_3=2Ω，求各支路的电流及电流源的电压 U。

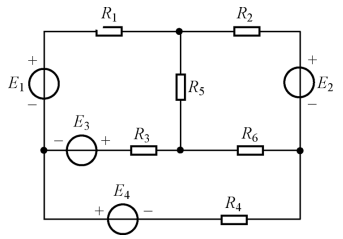


图 1-78

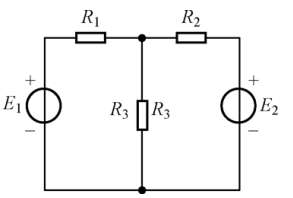


图 1-79

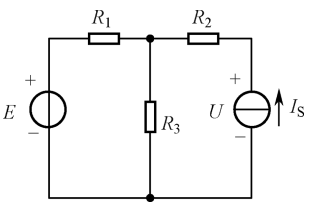


图 1-80

1.27　试用支路电流法求图 1-81 所示电路中的各支路电流。

1.28　试用节点电压法求图 1-82 所示电路中 5Ω和 3Ω电阻的电流。

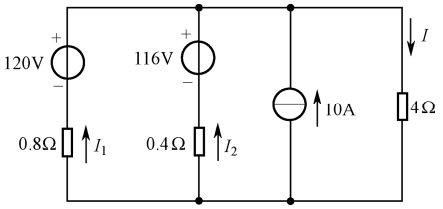


图 1-81

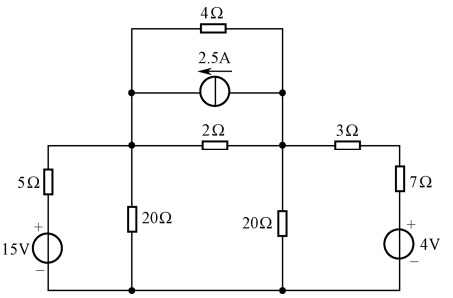


图 1-82

1.29　用节点电压法求图 1-83 所示电路中的节点 a、b、c 的节点电压。

1.30　用弥尔曼定理求解图 1-84 所示电路中的各支路电流。

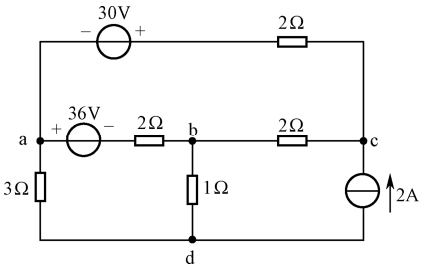


图 1-83

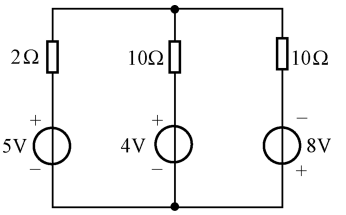


图 1-84

1.31　试用叠加原理求图 1-85 所示电路中的各电流 I。

1.32　用叠加原理计算图 1-86 所示电路中 4Ω电阻支路的电流 I，并计算该电阻吸收的功率 P。

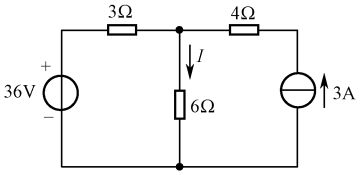


图 1-85

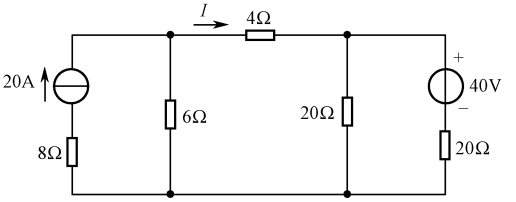


图 1-86

1.33　在图 1-87 所示的电路中，已知 R_1=8Ω，R_2=4Ω，R_3=6Ω，R_4=2Ω，U_S=8V，I_S=2A。试用戴维南定理求通过 R_2 的电流。

1.34　试用戴维南定理求图 1-88 所示电路的电流 I。

1.35　试用戴维南定理求图 1-89 所示电路中的 8Ω、5V 支路的电流。

1.36　试用戴维南定理求图 1-90 所示的二端网络的等效电压源。

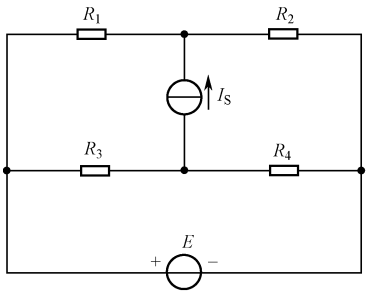


图 1-87

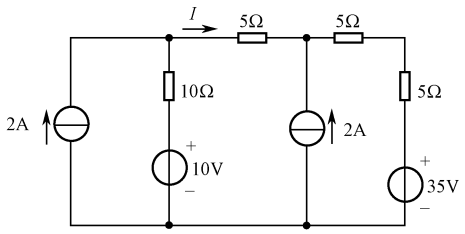


图 1-88

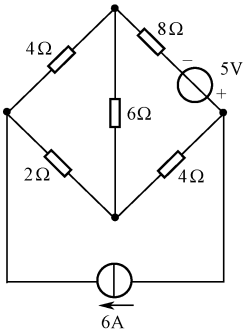


图 1-89

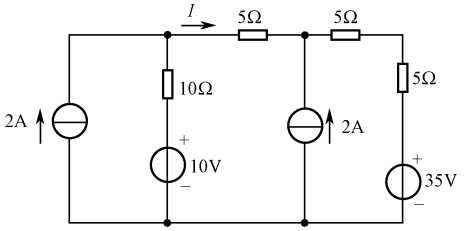


图 1-90

项目 2　正弦交流电路的分析与测试



项目内容

1. 正弦交流电的三要素，相位差，正弦交流电的表示方法；
2. 单一参数交流电路中的电压与电流关系；功率和能量转换；
3. RLC 组合电路中的电压与电流关系；功率和能量转换；
4. 提高交流电路功率因数的方法及交流电路中的谐振现象；
5. 三相对称电动势的产生及三相电源星形连接时的线电压与相电压的关系；
6. 三相负载的星形连接和三角形连接时的线电压与相电压的关系，线电流与相电流的关系；
7. 三相电路的功率。



知识目标

1. 理解交流电的基本概念，正弦交流电的三要素，掌握正弦交流电最大值与有效值的关系；
2. 掌握正弦交流电的三角函数、波形图及相量表示法，会用相量图分析正弦交流电路；
3. 掌握单一参数交流电路中的电压与电流的关系和功率计算，了解能量转换；
4. 掌握 RLC 串联电路中的电压与电流关系和功率计算，了解能量转换；
5. 掌握感性负载与电容器并联电路的分析，掌握正弦交流电路中提高功率因数的方法；
6. 了解谐振电路的条件和特征；
7. 了解三相对称电动势的产生，掌握三相电源星形连接时的相电压与线电压之间的关系；
8. 掌握三相对称负载星形和三角形连接时相关物理量的计算（包括相电压、线电压、相电流、线电流和三相电功率）；
9. 理解三相四线制电路的中线的作用，能正确地把负载接入三相电源。



能力目标

1. 会分析简单及较复杂的交流电路，并会使用交流电压表（毫伏表）、万用表测量交流电压及用交流电流表测量交流电流；
2. 会使用示波器测试低频信号发生器产生的典型信号；
3. 会进行白炽灯照明电路、电感式镇流器日光灯电路的安装、检测与维修。



情感目标

1. 培养高度的职业责任心和安全意识，遵章守纪、规范操作；

2. 训练团队精神，培养协同工作的素质和组织管理能力；
3. 锻炼信息、资料搜集与查找的能力。

任务 2.1　正弦交流电路的认识与测试



任务描述

在生产和生活中所用的电路几乎都是正弦交流电路。正弦交流电路是指含有正弦电源（激励）而且电路各部分所产生的电压和电流（响应）均随时间按正弦规律变化的电路。本任务学习正弦交流电的基本概念，正弦交流电的三要素、相位差，正弦交流电的表示方法及正弦交流电的测试。



任务目标

理解交流电的基本概念、正弦交流电的三要素，掌握正弦交流电最大值与有效值的关系，正弦交流电的三角函数、波形图及相量图表示方法。



任务实施

2.1.1　正交流电的基本知识及交流信号的测试



现象观察 —— 看一看

用示波器观察低频函数信号发生器的正弦输出信号，输出信号的频率为 1kHz，信号的大小约 2V。调节示波器使得在荧光屏上出现 2 个完整的波形，分别观察频率不同、幅度不同、计时起点不同时的波形。



知识链接 —— 学一学

大小和方向都随时间周期性变化的电压、电流、电动势分别称为交流电压、交流电流、交流电动势，统称之为交流电。大小和方向随时间按正弦规律变化的交流电称为正弦交流电。本书以后如不加说明，所说的交流电都是指正弦交流电。

在线性电路中，若激励为时间的正弦函数，则稳定状态下的响应也为时间的正弦函数，这样的电路称为正弦交流稳态电路，简称为正弦交流电路。

正弦交流电广泛应用于生产与生活的各个领域，它具有易产生、便于输送和使用的特点。

与直流电比较，正弦交流电具有发电成本低、便于远距离传输、转换效率高等优点。

正弦交流电路和直流电路具有根本的区别，但直流电路的分析方法原则上也适用于正弦交流电路。由于正弦交流电路电压和电流的大小和方向随时间按正弦规律变化，因此分析和计算比直流电路要复杂得多。

正弦交流电路的基本理论和分析方法是学习交流电机、电器的重要基础，分析与讨论正弦交流电路具有十分重要的意义。

1. 正弦交流电的基本知识

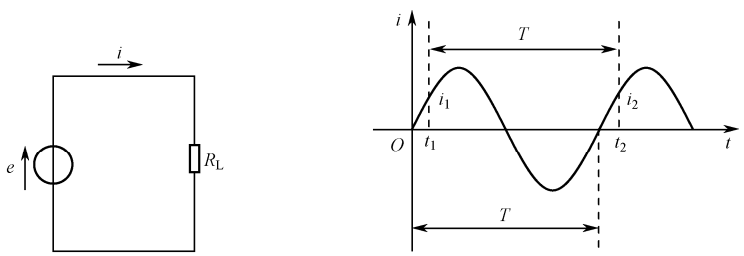
现代生产生活中用电大多属于交流电。交流电在其电能的产生、输送和使用方面，都有很大的优越性。例如，交流供电系统可以利用变压器方便而又经济地升高或降低电压，远距离输电时采用较高的电压可以减少线路上的电能损失；而用户用较低的电压，既安全又可降低电气设备的绝缘费用。又如，广泛应用的交流异步电动机与同等功率的直流电动机相比，具有构造简单、价格低廉、运行可靠、维护方便等优点。目前一些需用直流电的场合，如工业用的电解和电镀等，也是利用整流设备将交流电能转变为直流电能的。

交流电循环变化一周的时间称为周期，用 T 表示，周期的单位是秒（s）。单位时间内交流电变化循环的次数称为频率，用 f 表示，频率的单位是赫兹（Hz），简称赫。由定义可知，频率与周期互为倒数：

$$f=\frac{1}{T} \quad 或 \quad T=\frac{1}{f} \tag{2.1}$$

我国和世界上大多数国家都采用 50Hz 作为工业和民用电频率，称为工频。有些国家（如美国、日本等）用 60Hz 作为电力标准频率。通常交流电动力电路，照明电路都用工频电，在其他不同技术领域内使用不同的频率。例如，高频炉的频率是 200~300kHz，中频炉的频率是 500~800Hz，高速电动机的频率是 150~2000Hz，无线电调频广播载波频率为 88~108MHz，广播电视载波频率为 30~300MHz 等。

对于某一时刻 t，交流电的值称为交流电在 t 时刻的瞬时值。如图 2-1 所示，设 $t=t_1$ 时，$i=i_1$，$t=t_2$ 时，$i=i_2$，…，则 i_1，i_2，…就是对应于时刻 t_1，t_2，…的电流瞬时值。一般地，电流 i 是时间 t 的函数：$i=i(t)$。规定用小写字母表示交流的瞬时值，交流电动势、交流电压分别用 e、u 来表示。在一个周期内，交流电流瞬时值出现的最大的绝对值称为最大值或振幅（有时也称为幅值或峰值）。最大值用大写字母加下标 m 来表示，如：E_m、U_m、I_m 分别表示电动势、电压、电流的振幅。



（a）电路图　　（b）正弦曲线

图 2-1　正弦交流电的正方向及正弦曲线

正弦交流电也可用正弦曲线表示，如图 2-1（b）所示。由于交流电的方向是周期性变化的，所以必须在电路中先假定交流电的参考正方向，如图 2-1（a）所示电路中的两箭头分别指示 e 和 i 的参考正方向。当电流的瞬时值为正值，即电流方向与其参考正方向一致时，曲线就处于横坐标轴的上方；当电流瞬时值为负值，即其方向与参考正方向相反时，曲线就处于横坐标轴的下方。

正弦电压、电流、电动势统称为正弦电量。正弦电量的特征表现在快慢、大小及初始值三个方面，分别由周期（频率）、幅值（有效值）、初相位（相位）来确定，也称周期、幅值、初相位为正弦交流电的三要素。

2. 正弦交流电的三要素和相位差

（1）正弦交流电的三要素

图 2-2 画出了正弦交流电（以电流 i 为例）的一般变化曲线。对应于图 2-2 所示正弦曲线的瞬时值 i 的解析式即正弦函数表达式为：

$$i = I_{\mathrm{m}} \sin(\omega t + \varphi_0) \qquad (2.2)$$

式中，$\omega t + \varphi_0$ 称为正弦交流电的相位角，简称相位。相位是研究正弦交流电必须掌握的一个重要概念，它表示正弦交流电在某一时刻所处的变化状态，它不仅决定该时刻瞬时值的大小和方向，还决定该时刻的交流电变化的趋势（即增加还是减少）。

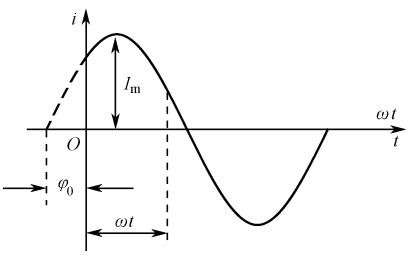


图 2-2　正弦交流电流变化曲线

当 t=0 时，交流电的相位角 φ_0 称为初相角，简称初相。初相表示计时开始时交流电所处的变化状态。图 2-1（b）中所绘制的正弦曲线是假设初相 φ_0=0 时的。

初相的取值范围一般规定为：$-\pi \leqslant \varphi_0 \leqslant \pi$。

最大值、角频率（或频率）、初相角合称为正弦交流电的三要素。它们分别表示正弦交流电的变化快慢、幅度及起始状态。由式（2.2）看出，正弦交流电的瞬时值是时间 t 的函数，只要 I_{m}、f、φ_0 这三个量给定了，这个函数也就完全确定了。

（2）正弦交流电的有效值

交流电的瞬时值随时间而变化，不便于用它来计量交流电的大小。在工程技术中，规定用有效值来衡量交流电的发热和做功的能力。规定为：设交流电流 i 通过一个电阻 R 在一个周期内产生的热量 Q，与一个恒定的直流电流 I 通过相同电阻 R，在相同时间所产生的热量 Q' 相等，就可以说这个直流电流 I 与交流电流 i 在发热方面是等效的，就把这个直流电流的数值 I，定义为该交流电流 i 的有效值。简而言之，交流电流的有效值就是热效应与它等同的直流值。用大写字母 I、U、E 分别表示交流电流、电压、电动势的有效值。

交流电流 i 一个周期内在 R 上产生的热量为：

$$Q = \int_0^T i^2 R \mathrm{d}t$$

直流电流 I 同一周期内在 R 上产生的热量为：

$$Q' = I^2 RT$$

若两者相等，Q=Q'，则

$$I^2RT=\int_0^T i^2R\mathrm{d}t$$

可得出周期电流的有效值为：

$$I=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2\mathrm{d}t}$$

设 $i=I_\mathrm{m}\sin\omega t$，则

$$I=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T I_\mathrm{m}^2\sin^2\omega t\mathrm{d}t}=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T\frac{1}{2}I_\mathrm{m}^2(1-\cos 2\omega t)\mathrm{d}t}=\frac{I_\mathrm{m}}{\sqrt{2}}=0.707I_\mathrm{m}\qquad(2.3)$$

即当电流 i 按正弦规律变化时，其有效值等于最大值的 $1/\sqrt{2}$。这个结论同样适用于正弦电压和电动势，即

$$U=\frac{U_\mathrm{m}}{\sqrt{2}},\quad E=\frac{E_\mathrm{m}}{\sqrt{2}}\qquad(2.4)$$

一般所说的正弦电压或电流的大小，都是指它的有效值；交流电压表、电流表的读数都是它们的有效值；交流电机和电器的额定电压、额定电流也都是有效值。

（3）相位差

分析交流电路时，经常会遇到若干个正弦交流电量，不仅要分析它们的数量关系，还必须分析它们的相位关系。通常只需研究几个同频率的正弦电量之间的相位关系。

把两个同频率正弦电量相位之差称为它们的相位差，记为φ。

设两个同频率的正弦电量 $u=U_\mathrm{m}\sin(\omega t+\varphi_\mathrm{u})$，$i=I_\mathrm{m}\sin(\omega t+\varphi_\mathrm{i})$，则 u 与 i 的相位差为：

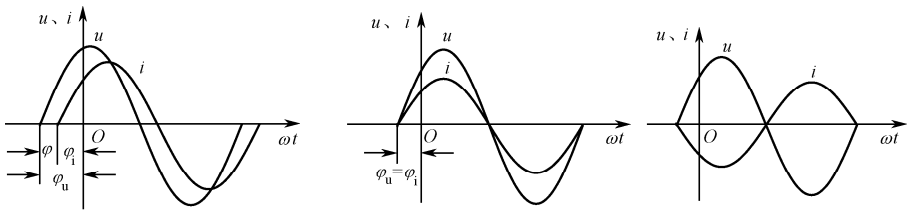
$$\varphi=(\omega t+\varphi_\mathrm{u})-(\omega t+\varphi_\mathrm{i})=\varphi_\mathrm{u}-\varphi_\mathrm{i}\qquad(2.5)$$

即两个同频率正弦电量的相位差等于它们的初相位之差。虽然每个正弦电量的相位随时间而变，但它们在任意时间相位差是不变的。

若$\varphi>0^\mathrm{o}$，表明$\varphi_\mathrm{u}>\varphi_\mathrm{i}$，如图 2-3（a）所示，称 u 超前 i 的相位为φ，或者说 i 滞后于 u 一个相位φ。

若$\varphi=0^\mathrm{o}$，表明$\varphi_\mathrm{u}=\varphi_\mathrm{i}$，如图 2-3（b）所示，称 u 与 i 同相位，两正弦电量同时达到最大值或同时为零。

若$\varphi=\pm180^\mathrm{o}$，如图 2-3（c）所示，称 u 与 i 反相位，当 u 为正的最大值时，i 为负的最大值。



（a）u超前i　　（b）u与i同相　　（c）u与i反相

图 2-3　正弦电量的相位差

据上所述，两个同频率的正弦电量计时起点 $t=0$ 不同时，它们的相位和初相位不同，但它们之间的相位差不变。

应用举例 —— 练一练

例 2.1　已知 $u=311\sin(314t+30^{\circ})\text{V}$，$i=14.14\sin(314t-60^{\circ})\text{A}$，求（1）电压、电流的有效值及相位差；（2）若以电压 u 为参考量，重新写出电压 u 和电流 i 的瞬时值表达式（本书的计算过程中 $\sqrt{2}$ 取 1.414，π 取 3.14，特此说明）。

解　（1）电压、电流有效值为：

$$U=\frac{U_{\text{m}}}{\sqrt{2}}=\frac{311}{\sqrt{2}}=220\ \text{（V）}$$

$$I=\frac{I_{\text{m}}}{\sqrt{2}}=\frac{14.14}{\sqrt{2}}=10\ \text{（A）}$$

u 与 i 的相位差为：

$$\varphi=\varphi_{\text{u}}-\varphi_{\text{i}}=30^{\circ}-(-60^{\circ})=90^{\circ}$$

（2）若以电压为参考量 φ_u=0°，则 φ_{i}=90°，有：

$$u=U_{\text{m}}\sin\omega t=310\sin 314t\ \text{（V）}$$

$$i=I_{\text{m}}\sin(\omega t+\varphi_{\text{i}})=14.1\sin(314t-90^{\circ})\ \text{（A）}$$

实践操作 —— 做一做

（1）交流信号的频率、大小测量。调节信号发生器，使其输出正弦信号，将示波器与函数信号发生器连接，分别通过示波器、晶体管毫伏表测量正弦信号的参数，将数据记入表 2-1 中。

（2）交流电压、电流的测量。按图 2-4 所示电路正确连接。电路图中的交流电源电压为 220V，50Hz，三个电阻可用三个 1kΩ 的电阻，也可以用三相相同的灯泡（220V、25W）。

测量电源两端电压及负载两端电压 U_{R1}、U_{R2}、U_{R3} 及负载电流 I_1、I_2、I_3，将测量数据填入到表 2-2 中。

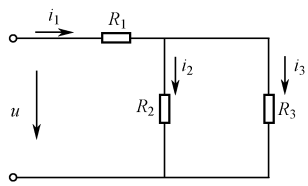


图 2-4　实践操作图

表 2-1　交流信号的频率、大小的测量

测 试 项 目	频率/Hz			信号值/mV		
	1	2	3	1	2	3
用示波器测量						
用晶体管毫伏表测量	——	——	——			

表 2-2　交流电压、电流的测量

测 试 项 目	U	U_{R1}	U_{R2}	U_{R3}	I_1	I_2	I_3
测量值							

测量时**应注意**：如果事先不知道被测电压、电流的大小，应尽量选用较大的量程测一次，然后根据实际情况再选择合适的量程；测试时手一定不能碰到表笔的金属部分，以免引起电击。

问题研讨 —— 想一想

（1）如果两个不同频率的正弦电量，在某一时刻同时达到正的最大值，能否断定它们是同相的？为什么？

（2）万用表的交流电压挡、交流电压表及晶体管毫伏表分别用于测量什么情况下的交流电压？

2.1.2 正弦交流的相量表示及测试

现象观察 —— 看一看

调节低频信号发生器的输出电压 U 为 5V，频率为 1kHz。测量 RC 串联电路中电阻两端电压 U_R 及电容两端的电压 U_C，这时 $U \neq U_R + U_C$。

知识链接 —— 学一学

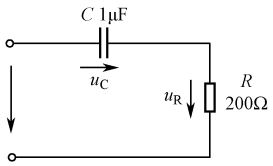


图 2-5　交流电压测试图

正弦电量可以用三角函数或波形图来表示，当分析正弦交流电路时，如图 2-5 所示电路中，由基尔霍夫定律得 $u=u_R+u_C$，无论用三角函数表示法还是用波形图表示法进行同频率的正弦电量的加、减、乘、除运算，都非常烦琐，一般不采用。下面介绍的正弦电量的相量表示法，将为分析、计算正弦交流电路带来极大的方便。

正弦电量的相量表示法的基础是复数，就是用复数来表示正弦电量。

1. 复数的基本知识

（1）复数的表示式

设 A 为复数，复数的代数式为

$$A=a+\mathrm{j}b \tag{2.6}$$

a、b 分别为复数 A 的实部和虚部，$\mathrm{j}=\sqrt{-1}$ 为虚数单位。复数 A 可以用由实数轴（单位＋1）、虚数轴（单位＋j）的复平面的有向线段 OA 矢量来表示，如图 2-6 所示。其中，$r=\sqrt{a^2+b^2}$ 为复数的大小，称为复数的模；$\varphi=\arctan\dfrac{b}{a}$ 为复数与实轴正方向间的夹角，称为复数的辐角。在 r、φ已知时，由图 2-6 可知：$a=r\cos\varphi$，$b=r\sin\varphi$。

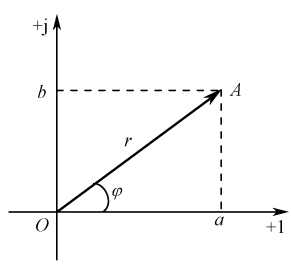


图 2-6　复数的相量表示

复数的三角函数式为

$$A=r(\cos\varphi+\mathrm{j}\sin\varphi) \tag{2.7}$$

将欧拉公式 $\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}=\cos\varphi+\mathrm{j}\sin\varphi$代入上式，则得复数的指数形式

$$A=r\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi} \tag{2.8}$$

为了简便，工程上常把指数形式写成极坐标形式，即

$$A = r\angle\varphi \tag{2.9}$$

一个复数可用上述四种复数形式来表示，复数的四种表示式可相互转换。

（2）复数的运算

复数的加减运算可用代数式进行，复数的乘除运算可采用指数式或极坐标式进行。

设有两个复数：$A_1=a_1+\mathrm{j}b_1=r_1\angle\varphi_1$，$A_2=a_2+\mathrm{j}b_2=r_2\angle\varphi_2$

加减运算：

$$A=A_1\pm A_2=(a_1+\mathrm{j}b_1)\pm(a_2+\mathrm{j}b_2)=(a_1\pm a_2)+\mathrm{j}(b_1\pm b_2) \tag{2.10}$$

即几个复数相加或相减，实部和虚部分别相加减。

乘法运算：

$$A=A_1\cdot A_2=r_1\cdot r_2\angle(\varphi_1+\varphi_2) \tag{2.11}$$

即复数相乘时，其模相乘，辐角相加。

除法运算：

$$A=\frac{A_1}{A_2}=\frac{r_1}{r_2}\angle(\varphi_1-\varphi_2) \tag{2.12}$$

即复数相除时，其模相除，辐角相减。

作为两个复数相乘的特例，是一个复数乘以＋j 或–j。

因为，$e^{\pm\mathrm{j}90^\circ}=\cos 90^\circ\pm\mathrm{j}\sin 90^\circ=0\pm\mathrm{j}=\pm\mathrm{j}$。所以，±j 是模为 1，辐角为$\pm 90^\circ$的复数，所以任意复数乘以+j的计算为：

$$\mathrm{j}A_1=1\angle 90^\circ\times r_1\angle\varphi_1=r_1\angle(\varphi_1+90^\circ)$$

即：任一复数乘以＋j，其模不变，辐角增大 90°，相当于把复矢量 A 逆时针旋转 90°，如图 2-7 所示。

同理

$$-\mathrm{j}A_1=1\angle(-90^\circ)\times r_1\angle\varphi_1=r_1\angle(\varphi_1-90^\circ)$$

即：任一复数乘以–j，其模不变，辐角顺时针转过 90°，如图 2-7 所示。±j 称为旋转因子。

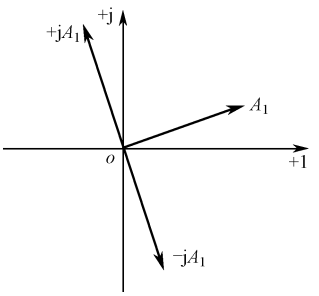


图 2-7　j 的几何意义

2. 正弦电量的相量表示法

用复数表示正弦电量的方法称为正弦电量的相量表示法。将复数表示法及四则运算用于正弦电路的分析与计算的方法称为正弦电量的相量法。

设正弦电流为 $i=I_\mathrm{m}\sin(\omega t+\varphi_\mathrm{i})=I\sqrt{2}\sin(\omega t+\varphi_\mathrm{i})$ 和一个复数 $I_\mathrm{m}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\varphi_\mathrm{i})}$，将二者加以比较，发现它们之间有如下对应关系。

（1）复数的模和辐角分别等于正弦电量的最大值 I_m 和相位（$\omega t+\varphi$）；

（2）正弦电量的瞬时值恰好为复数的虚部，即

$$I_\mathrm{m}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\varphi_\mathrm{i})}=I_\mathrm{m}\cos(\omega t+\varphi_\mathrm{i})+\mathrm{j}\,I_\mathrm{m}\sin(\omega t+\varphi_\mathrm{i})$$

（3）复数 $I_\mathrm{m}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t+\varphi_\mathrm{i})}=I_\mathrm{m}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}\cdot\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}=\dot{I}_\mathrm{m}\cdot\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}$，等于一个复常数（也称复振幅）$\dot{I}_\mathrm{m}$ 乘以旋转因子 $e^{\mathrm{j}\omega t}$，相当于复平面上一个模不变、辐角随时间而变化的旋转矢量（旋转角速度为正弦电量角频率ω）。该旋转矢量在虚轴上的投影，正等于正弦电量的瞬时值。显然，这个复数完整地表示了正弦电量的三要素，如图 2-8 所示。

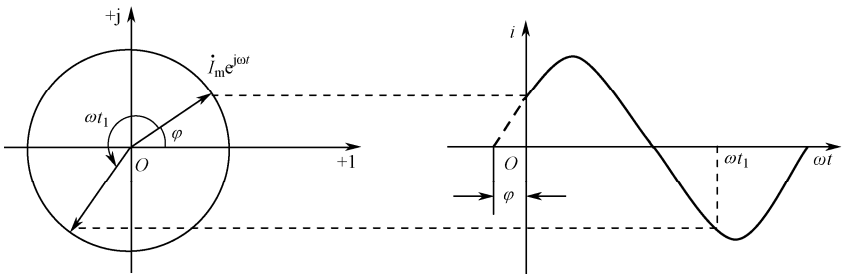


图 2-8　旋转相量与正弦电量的示意图

$t=t_1$ 时，旋转矢量对应的复数为 $\dot{I}_m \cdot e^{j\omega t_1}$，此时电流为：

$$i_1 = J_m[\dot{I}_m e^{j\omega t_1}] = I_m \sin(\omega t_1 + \varphi_i)$$

式中，J_m 表示取[　]内的虚部。

（4）在线性电路中，如果激励都是同频率的正弦电量，则电路各部分的响应是与激励同频率的正弦电量。就是说，为了确定或区分正弦电压、电流，只需考虑最大值和初相位这两个要素就足够了。因此，正弦电量可由初位置（$t=0$ 时）的矢量 $\dot{I}_m = I_m \angle \varphi_i$ 唯一确定，即正弦电流 $i = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$ 可以用复数（复常数）$\dot{I}_m = I_m \angle \varphi_i$ 来表示，并称复数 $\dot{I}_m$ 为电流 i 的相量。复数不再是时间的函数，可以参与一般的复数运算，但是，它所表示的电流仍是时间的正弦函数。由于在电路分析中经常使用有效值，所以正弦电量的相量也常用有效值表示，即将其模除以 $\sqrt{2}$，辐角保持不变。为与一般复数相区别，用大写字母表示，并在大写字母的上方加一小圆点，即 $\dot{I} = I \angle \varphi_i$。

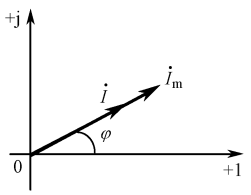


图 2-9　电流的相量图

正弦电量可用复平面上的一个复矢量表示，如图 2-9 所示。复数的模各为正弦电量的最大值或有效值，复数的辐角为正弦电量的初相位。

同理，正弦电压、电动势的幅值相量和有效值相量分别为：

$$\dot{U}_m = U_m \angle \varphi_u,\quad \dot{E}_m = E_m \angle \varphi_e;\quad \dot{U} = U \angle \varphi_u,\quad \dot{E} = E \angle \varphi_e。$$

应注意：相量只是表示正弦电量，而不是等于正弦电量。用相量表示正弦电量后，就可把烦琐的三角函数运算转换为简单的复数运算。

由于在分析线性电路时，正弦电动势、电压、电流均为同频率的正弦电量，频率是已知的或特定的，可以不考虑，只要求出正弦电量的幅值（或有效值）和初相位，即可写出正弦电量函数表示式。

多个同频率的正弦电量，按各正弦电量的大小和初相位，用矢量画在同一复平面上的若干个相量图形，称为相量图。例如，$\dot{I} = 10 \angle 30^\circ$A，$\dot{U} = 20 \angle (-45^\circ)$ V 用相量图表示如图 2-10 所示。在相量图上可直观地看出正弦电量的大小和相互间的相位关系，电流相量 $\dot{I}$ 比电压相量 $\dot{U}$ 超前 75°。正弦电量的相量表示法有两种形式：一是复数式，常用代数式（或三角式）做相量的加减运算，常用指数（或极坐标式）做相量的乘除运算；二是相量图，它是配合复

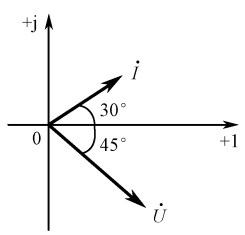


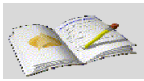
图 2-10　电压、电流的相量图

数式进行电分析和计算的一个很有用的辅助工具。

正弦电量用相量表示后，基尔霍夫定律的瞬时值（任一瞬间都成立）形式 $\sum i=0$，$\sum u=0$ 就变换为

$$\sum \dot{I}=0 \tag{2.13}$$

$$\sum \dot{U}=0 \tag{2.14}$$



应用举例 —— 练一练

例 2.2　已知一并联电路的 $i_1=4\sqrt{2}\sin(314t+60°)$ A，$i_2=3\sqrt{2}\sin(314t-30°)$ A，试求总电流 i。

解　（1）借助相量图求解，画出 i_1、i_2 的相量图如图 2-11 所示。

用平行四边形法画出总电流 i 的相量 $\dot{I}$，由相量图可知，$\dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_2$ 的夹角为 90°，所以

$$I=\sqrt{I_1^2+I_2^2}=\sqrt{4^2+3^2}=5\ (\text{A})$$

相量 $\dot{I}$ 与横轴的夹角 φ 就是总电流 $\dot{I}$ 的初相位。

$$\varphi=\arctan\frac{4}{3}-30°=23.1°$$

总电流的瞬时值表示式为：

$$i=5\sqrt{2}\sin(314t+23.1°)\ (\text{A})$$

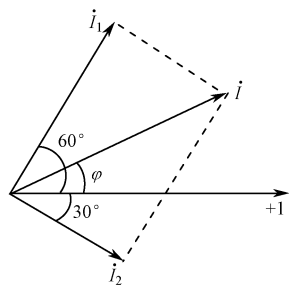


图 2-11　例 2.2 的相量图

（2）用相量法求解，将 $i=i_1+i_2$ 转化为基尔霍夫电流定律的相量表示式为：$\dot{I}=\dot{I}_1+\dot{I}_2$。所以

$$\begin{aligned}\dot{I}&=\dot{I}_1+\dot{I}_2\\&=(4\cos 60°+\text{j}4\sin 60°)+[3\cos(-30°)+\text{j}3\sin(-30°)]\\&=(2+\text{j}3.47)+(2.6-\text{j}1.5)=4.6+\text{j}1.87=5\angle 23.1°\ \text{A}\end{aligned}$$

总电流瞬时值的表示式为：

$$i=5\sqrt{2}\sin(314t+23.1°)\ (\text{A})$$

由上例可知，用相量表示正弦电量后，可简化正弦电量的运算，并能同时求出正弦电量的大小和初相位，相量法是正弦交流电路的普遍运算方法。常用相量图表示各正弦电量之间的关系，并借助相量图进行相量运算。



实践操作 —— 做一做

在实验线路板上连接图 2-12 所示电路，测试并联电路各支路电流，思考所测得的结果。

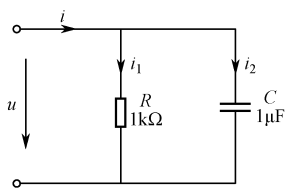


图 2-12　并电路电流关系测试电路

问题研讨 —— 想一想

（1）对两个频率不相同的正弦电量，能否比较它们之间的相位关系？为什么？能否把它们画在同一张相量图中？为什么？

（2）万用表的交流电压挡、交流电压表及晶体管毫伏表分别用于测量什么情况下的交流电压？

（3）查阅资料，分析讨论非正弦交流电的有效值和最大值之间的关系。

任务 2.2　单一参数正弦交流电路的分析与测试

任务描述

电阻、电感、电容等单个元件组成的正弦交流电路，是最简单的交流电路，它们在交流电路中的特性是分析实际交流电路的基础。本任务学习单一元件交流电路中的电压与电流的关系，功率、能量转换及电路测试。

任务目标

了解纯电阻、纯电感、纯电容电路中的能量转换。掌握电压与电流关系，能较熟练地画出相应的相量图，掌握单一元件电路中的功率计算。

任务实施

2.2.1　纯电阻正弦交流电路的分析与测试

现象观察 —— 看一看

按图 2-13 连接电路，信号发生器输出的电压为 3V，调节频率从 200Hz 逐渐增至 5kHz，用交流毫伏表测量 U_R，观察 u_R 大小的变化，即电流 i_R（等于 u_R/R）随频率的变化；调整信号发生器输出信号的频率为 1kHz，输出电压为 3V，并保持不变，用示波器观测 u_R 的波形和 u_R 的相位。

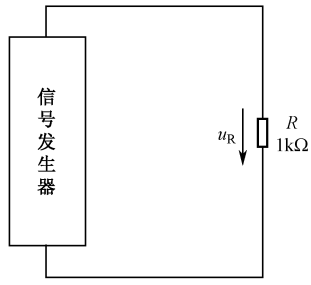


图 2-13　纯电阻交流电路

知识链接 —— 学一学

在交流电路中，凡是由电阻起主导作用的各种负载（如

白炽灯、电阻炉及电烙铁等）都称为电阻元件，仅由电阻元件组成的电路称为纯电阻电路。

1. 纯电阻正弦交流电路中的电压与电流关系

如图 2-14（a）所示是一线性电阻元件的交流电路，图中标明了电压、电流的参考正方向。设 $i=I_{\mathrm{m}}\sin\omega t$，根据欧姆定律得：

$$u = iR = I_{\mathrm{m}}R\sin\omega t = U_{\mathrm{m}}\sin\omega t$$

其中，$U_{\mathrm{m}}=I_{\mathrm{m}}R$。

则

$$I = \frac{U}{R} \tag{2.15}$$

相量关系为：

$$\dot{U} = \dot{I}\,\dot{R} \tag{2.16}$$

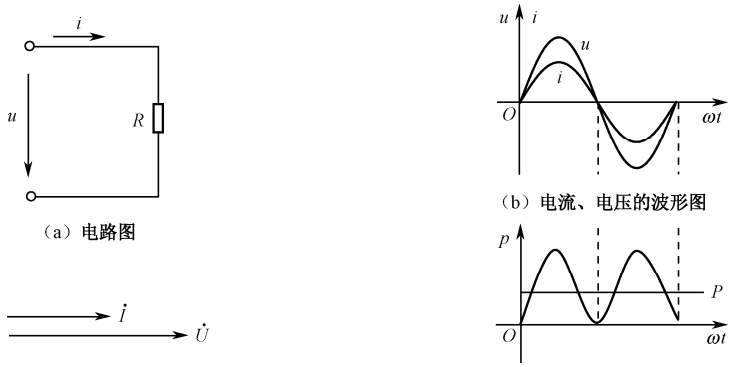
在正弦电路中，电阻的电压和电流同频率；电压与电流相位相同；电压、电流有效值（或最大值）之间的关系符合欧姆定律。它们的波形图和相量图如图 2-14（b）、（c）所示。

2. 纯电阻正弦交流电路中的功率和能量转换

在任一瞬时，电路所吸收的功率称为瞬时功率，用小写字母 p 表示，它等于该瞬时的电压 u 和电流 i 的乘积。电阻电路所吸收的瞬时功率为：

$$p = ui = U_{\mathrm{m}}\sin\omega t \times I_{\mathrm{m}}\sin\omega t = \sqrt{2}U\sqrt{2}I\sin^2\omega t = UI(1-\cos 2\omega t)$$

功率的变化曲线如图 2-14（d）所示。由于 $p\geqslant 0$，电阻总是吸收功率，并不断地将电能转换为热能。



（a）电路图　（b）电流、电压的波形图

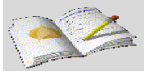
（c）电流、电压的相量图　（d）功率波形图

图 2-14　纯电阻交流电路

由此可见，瞬时功率是随时间周期变化的，电工技术上，通常取瞬时功率在一个周期内的平均值来表示交流电功率的大小，称为平均功率（又称有功功率、功率），用大写字母 P 表示。纯电阻电路的平均功率为：

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p\,\mathrm{d}t = \frac{1}{T}\int_0^T UT(1-\cos 2\omega t)\,\mathrm{d}t = UI$$

$$P = UI = I^2R = \frac{U^2}{R} \tag{2.17}$$



应用举例 —— 练一练

例 2.3 有一个电阻 R=20Ω，加在其上电压 u=200sin（314t+30°）V，试求：（1）流过电阻电流的最大值和有效值，写出瞬时值表达式；（2）计算电阻一小时所消耗的电能。

解 （1）$I_m=\dfrac{U_m}{R}=\dfrac{200}{20}=10$（A）

$$I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}=\frac{10}{\sqrt{2}}=7.07\ \text{（A）}$$

$$i=10\sin(314t+30^\circ)\ \text{（A）}$$

（2）$W=Pt=I^2Rt=(7.07^2\times20)\times10^{-3}\times1=1.0$ （kW·h）



实践操作 —— 做一做

纯电阻交流电路的测试，按图 2-13 连接线路，电路中的电阻 R=1kΩ，交流电源用信号发生器代替，信号发生器的输出信号：U=10V，f=1kHz。

（1）将双踪示波器的 CH1 通道接电源电压探头，采样电源两端电压信号，CH2 通道接电阻电压探头，实际是采样流过电阻的电流信号，读取相关数据，填入表 2-3 中。

（2）选择合适的水平和垂直标度，将触发电平设置到 CH1 上，即可得到相应的电压与电流的波形图。

（3）用晶体管毫伏表测量电阻两端的电压，用交流电流表测量流过电阻的电流，将读出数据填入表 2-3 中。

（4）对表 2-3 中的有关数据进行分析计算，将计算值填入表 2-3 中。

表 2-3 纯电阻正弦交流电路的测试

测 试 项 目	频率	相位	最大值	有效值	毫伏表测量值
电源电压					
电阻电压					
交流电流					
U_m/I_m		U/I		电阻电压与电流的相位差	

测试时**应注意**：有的函数信号发生器设定值是信号的幅值，请参见有关仪器的说明书进行设定；采用双踪示波器才可观察到两波形的相位差；电阻两端的电压波形的相位代表通过电阻电流的相位。



问题研讨 —— 想一想

（1）将在交流电路中使用的 220V、60W 的白炽灯接在 220V 的直流电源上，试问发光亮度是否相同？为什么？

（2）在纯电阻交流电路中，下列表达式是否正确？

（a）$i=\dfrac{u}{R}$，（b）$\dot{I}=\dfrac{\dot{U}}{R}$。

2.2.2　纯电感正弦交流电路的分析与测试

现象观察 —— 看一看

按图 2-15 连接电路，信号发生器输出的电压为 3V，调节频率从 200Hz 逐渐增至 5kHz，用交流毫伏表测量 U_R，观察 u_R 大小的变化，即电流 i_L（等于 u_R/R）随频率的变化；调信号发生器输出信号的频率为 1kHz，输出电压为 3V，并保持不变，用双踪示波器分别观测 u_L、u_R 的波形，观察 u_L、u_R 的相位关系。

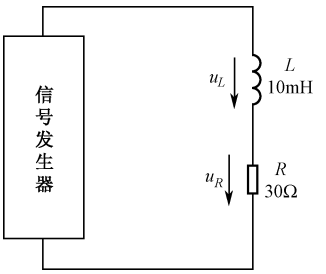


图 2-15　纯电感交流电路

知识链接 —— 学一学

1. 纯电感正弦交流电路中的电压与电流关系

如图 2-16（a）所示，设电感中的电流 $i=I_{\mathrm{m}}\sin\omega t$，若电压与电流的方向采用关联参考正方向，则

$$u=L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}=I_{\mathrm{m}}\omega L\cos\omega t=I_{\mathrm{m}}\omega L\sin(\omega t+90^\circ)=U_{\mathrm{m}}\sin（\omega t+90^\circ）$$

其中，$U_{\mathrm{m}}=I_{\mathrm{m}}\omega L$ 或 $U=I\omega L$，$\varphi_{\mathrm{u}}=90^{\mathrm{o}}$。则 $I=\dfrac{U}{\omega L}$，即 U 一定时，ωL 越大，I 越小。ωL 反映了电感对电流的阻碍作用，称为电感电抗，简称感抗，用 X_{L} 表示为：

$$X_{\mathrm{L}}=\omega L=2\pi fL \tag{2.18}$$

X_{L} 的单位为欧姆（Ω）。感抗 X_{L} 与电感 L、频率 f 成正比。可见，电感线圈对高频电流有较大的阻力，对直流频率 $f=0$，感抗 $X_{\mathrm{L}}=0$，可视为短路。

$$I=\frac{U}{X_{\mathrm{L}}} \tag{2.19}$$

相量关系为：

$$\dot{U}=\mathrm{j}\dot{X}_{\mathrm{L}} \tag{2.20}$$

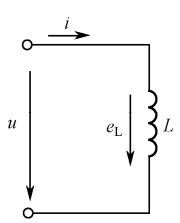
在正弦电路中，电感的电压与电流同频率；电压在相位上超前电流 90°，或者说电流滞后于电压 90°；电压、电流有效值（或最大值）之间的关系符合欧姆定律。它们的波形图和相量图如图 2-16（b）、（c）所示。

2. 纯电感正弦交流电路中的功率和能量转换

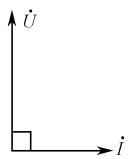
纯电感电路的瞬时功率为：

$$p=ui=U_{\mathrm{m}}I_{\mathrm{m}}\cos\omega t\cdot\sin\omega t=UI\sin 2\omega t$$

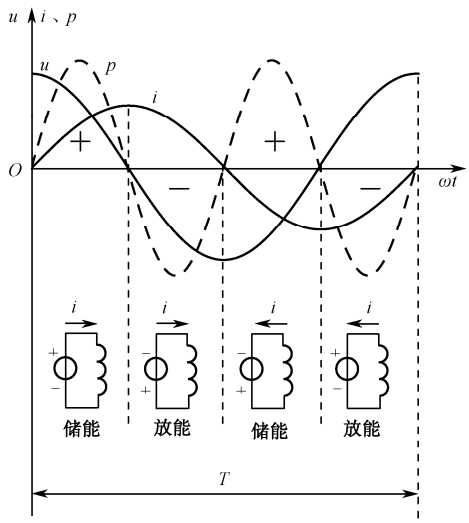
功率的变化曲线如图 2-16（b）所示。在第一个与第三个 1/4 周期内，电感中的电流值在增大，磁场在建立，电感从电源吸收能量并转换为磁场能量，所以 $p>0$（u 与 i 方向一致）。第二个与第四个 1/4 周期内，电感中的电流在减小、磁场在减小，电感将储存的磁场能量又转换为电能还回电源，即 $p<0$（u 与 i 方向相反）。



（a）电路图



（c）电流、电压的相量图



（b）电压、电流和功率波形图

图 2-16　纯电感交流电路

电感元件电路的平均功率为：

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T p\mathrm{d}t=\frac{1}{T}\int_0^T UI\sin 2\omega t\mathrm{d}t=0$$

平均功率等于零，说明电感只与电源往复不断地交换能量。能量交换的大小用无功功率 Q_L 来衡量，即

$$Q_L=UI=I^2X_L=\frac{U^2}{X_L} \tag{2.21}$$

为了与有功功率相区别，无功功率的单位为乏（var）或千乏（kvar）。



应用举例 —— 练一练

例 2.4　有一个电感线圈 L=50mH，接在电压 $u=220\sqrt{2}\sin(314t+60^\circ)$ V 的电源上，试求：（1）流过该电感的电流 i；（2）画出电流、电压的相量图；（3）求电路的无功功率。

解　（1）感抗为：$X_L=\omega L=314\times50\times10^{-3}=15.7$（Ω）

电流有效值为：$I=\dfrac{U}{X_L}=\dfrac{220}{15.7}=14$（A）

由于纯电感电路中电流滞后电压 90°，所以，电流瞬时值表达式为：

$$i=14\sqrt{2}\sin(314t-30^\circ)\text{（A）}$$

（2）电压、电流的相量图如图 2-17 所示。

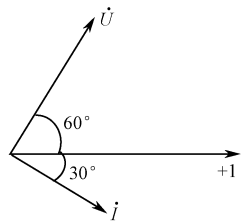


图 2-17　例 2.4 电压、电流相量图

（3）电路的无功功率为：　$Q_{\mathrm{L}}=UI=220\times14=3080(\mathrm{var})$



实践操作 —— 做一做

纯电感交流电路的测试，按图 2-15 连接线路，电路中的电感 L=100mH，为了能测试电流，在电路中串联一个很小的电阻 R=10Ω，交流电源用信号发生器代替，U=10V，f=1kHz。

（1）将双踪示波器的 CH1 通道接电感电压探头，采样电感两端电压信号，CH2 通道接电阻电压探头，读出相关数据，填入表 2-4 中。

（2）选择合适的水平和垂直标度，将触发电平设置到 CH1 上，即可得到相应的电压与电流的波形图。

（3）用交流毫伏表测量电阻、电感两端的电压，用交流电流表测量流过电阻中的电流，将读出数据填入表 2-4 中。

（4）对表中的有关数据进行分析计算，将计算值填入表 2-4 中。

表 2-4　电感电路的测量

测 试 项 目	频率	相位	最大值	有效值	毫伏表测量值
电感电压					
电阻电压					
交流电流					
$U_{\mathrm{m}}/I_{\mathrm{m}}$		U/I		电感电压与电流的相位差	



问题研讨 —— 想一想

（1）为什么人们常把电感线圈称为“低通”元件（意即低频电流容易通过）。

（2）在纯电感交流电路中，下列表达式是否正确？

（a）$i=\dfrac{u}{X_{\mathrm{L}}}$，（b）$\dot{I}=\dfrac{\dot{U}}{X_{\mathrm{L}}}$，（c）$I=\dfrac{U}{\mathrm{j}X_{\mathrm{L}}}$。

2.2.3　纯电容正弦交流电路的分析与测试



现象观察 —— 看一看

按图 2-18 连接电路，信号发生器输出的电压为 3V，调节频率从 200Hz 逐渐增至 5kHz，用交流毫伏表测量 U_R，观察 u_R 大小的变化，即电流 i_C（等于 u_R/R）随频率的变化；调信号发生器输出信号的频率为 1kHz，输出电压为 3V，并保持不变，用双踪示波器分别观测 u_C、u_R 的波形，观察 u_C、u_R 的相位关系。

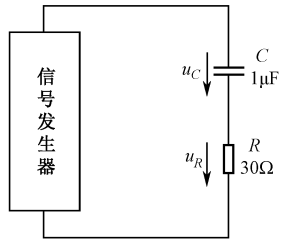


图 2-18　纯电容交流电路

知识链接 —— 学一学

1. 纯电容交流电路中的电压与电流的关系

如图 2-19（a）所示为一个理想电容元件的交流电路，图中标明了电压、电流的参考正方向。当电压发生变化时，电容器极板上电量也要随之发生变化。

设电容上的电压为 $u=U_{\mathrm{m}}\sin\omega t$，则

$$i=C\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}=U_{\mathrm{m}}C\omega\cos\omega t=U_{\mathrm{m}}\omega C\sin(\omega t+90^{\circ})=I_{\mathrm{m}}\sin(\omega t+90^{\circ})$$

其中，$I_{\mathrm{m}}=U_{\mathrm{m}}\omega C$ 或 $I=U\omega C=U/(1/\omega C)$，$\varphi_{\mathrm{i}}=90^{\circ}$。则 $I=\dfrac{U}{1/\omega C}$，即 U 一定时，$1/\omega C$ 越大，I 就越小，$1/\omega C$ 反映了电容对电流的阻碍作用，称为电容电抗，简称容抗，用 X_{C} 表示为：

$$X_{\mathrm{C}}=\frac{1}{\omega C}=\frac{1}{2\pi fC} \tag{2.22}$$

容抗的单位为欧姆（Ω）。容抗 X_{C} 与电容 C、频率 f 成反比。可见，电容元件对高频电流阻力较小，对低频电流阻力较大，对直流频率 $f=0$，容抗 $X_{\mathrm{C}}\to\infty$，可视为开路。电容元件有隔断直流的作用。

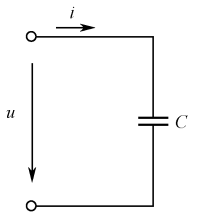
则

$$I=\frac{U}{X_{\mathrm{C}}} \tag{2.23}$$

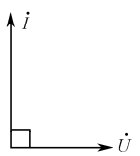
相量关系为：

$$\dot{U}=-\mathrm{j}X_{\mathrm{C}}\dot{I} \tag{2.24}$$

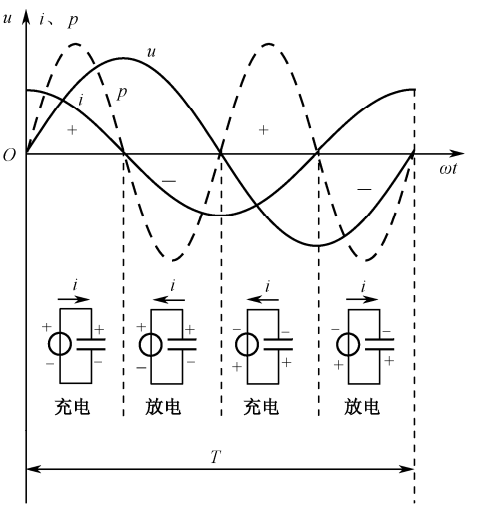
在正弦电路中，电容的电压与电流同频率；电流在相位上超前电压 90°，或者说电压滞后于电流 90°，电压、电流有效值（或最大值）之间的关系符合欧姆定律。它们的波形图和相量图如图 2-19（b）、（c）所示。



（a）电路图



（c）电流、电压的相量图



（b）电压、电流和功率的波形图

图 2-19　纯电容交流电路

2. 纯电容正弦交流电路中的功率和能量转换

在纯电容电路中，电压与电流的相位差为 90°，不消耗电能，平均功率等于零。只是电容与电源之间不断地进行能量交换。能量交换的大小用无功功率 Q_C 来衡量，即

$$Q_C = UI = I^2 X_C = \frac{U^2}{X_C} \tag{2.25}$$



应用举例 —— 练一练

例 2.5　有一电容元件 C=39.5μF，接在频率为 50Hz、电压有效值为 220V 的正弦电源上，试求：（1）电容的容抗；（2）电容的无功功率 Q_C。

解　（1）容抗为：$X_C = \dfrac{1}{2\pi fC} = \dfrac{1}{2\pi \times 50 \times 39.5 \times 10^{-6}} = 80$（Ω）

（2）电流的有效值为：$I = \dfrac{U}{X_C} = \dfrac{220}{80} = 2.75$（A）

电容的无功功率为：$Q_C = I^2 X_C = 2.75^2 \times 80 = 605$（var）



实践操作 —— 做一做

纯电容交流电路的测试，按图 2-18 连接线路，电路中的电容 C=10μF，为了能测试电流，在电路中串联了一个很小的电阻，电阻 R=10Ω，交流电源用函数信号发生器代替，U=10V，f=100Hz。

（1）将双踪示波器的 CH1 通道接电容电压探头，采样电容两端电压信号，CH2 通道接电阻电压探头，读出相关数据，填入表 2-5 中。

（2）选择合适的水平和垂直标度，将触发电平设置到 CH1 上，即可得到相应的电压与电流的波形图。

（3）用交流毫伏表测量电阻、电容两端的电压，用交流电流表测量流过电阻中的电流，将读出数据填入表 2-5 中。

（4）对表 2-5 中的有关数据进行分析计算，将计算值填入表 2-5 中。

表 2-5　电容电路的测量

测 试 项 目	频率	相位	最大值	有效值	毫伏表测量值
电容电压					
电阻电压					
交流电流					
U_m/I_m		U/I		电容电压与电流的相位差	

问题研讨 —— 想一想

（1）为什么人们常把电容器称为“高通”元件？

（2）在纯电容交流电路中，下列表达式是否正确？

（a）$i=\dfrac{u}{X_C}$　　（b）$\dot{I}=\dfrac{\dot{U}}{X_C}$　　（c）$I=\dfrac{U}{\mathrm{j}X_C}$

任务 2.3　多参数组合的正弦交流电路的分析与测试

任务描述

实际的电路元件不可能是单一参数的“纯”电路元件，如一个线圈既含有电感也含有电阻，一个电容器一般既含有电容又含有电阻等，所以实际的电路元件可以等效为电阻、电感、电容的不同组合。本任务学习 RLC 串联交流电路中的电压与电流的关系，功率和能量转换，RLC 串联谐振电路；感性负载与电容器并联交流电路中的电压与电流的关系，功率和能量转换及复杂正弦交流电路的分析；RLC 串联正弦交流的电路的测试，荧光灯照明电路的安装与测试。

任务目标

了解 RLC 串联交流电路中的能量转换，串联谐振的条件及特点；感性负载与电容器并联交流电路中的能量转换。掌握 RLC 串联交流电路中感性负载与电容器并联交流电路中的电压与电流关系，能较熟练地画出相应的相量图，学会用相量分析较复杂的交流电路，掌握 RLC 串联交流电路中的功率计算。掌握感性负载与电容并联交流电路中的功率计算及提高电路功率因数的意义和方法。

任务实施

2.3.1　RLC 串联正弦交流电路的分析与测试

现象观察 —— 看一看

测试实验电路如图 2-20 所示，分别测试在开关 S_1 闭合、S_2 断开时构成的 RL 串联电路，在开关 S_1 断开，S_2 闭合时的 RC 串联电路和在开关 S_1、S_2 都断开时构成的 RLC 串联电路的总电压与各分电压的关系（R=200Ω，C=0.1μF，L=30mH，f=500Hz，U=3V）。

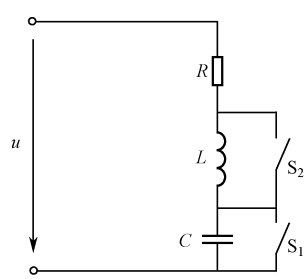


图 2-20　串联测试电路

利用图（b）所示电路观察对应状态的总电压与总电流的相位关系，特别是 RLC 串联电路，在改变电源的频率时找到 U_R 出现最大值及其前后的波形变化。



知识链接 —— 学一学

实际电路一般可看成由几种理想电路元件组成，RLC 的串联电路是一种典型电路，其中的一些概念和结论可用于各种复杂的交流电路，而单一参数电路、RC 串联电路、RL 串联电路则可看成是它的特例。

1. RLC 串联正弦交流电路中的电压与电流关系

电阻 R、电感 L、电容 C 串联电路如图 2-21（a）所示。电路各元件流过同一电流，图中标出了电流与各元件电压的正方向。设电流瞬时值表达式为 $i=I_m\sin\omega t$，根据基尔霍夫电压定律，$u=u_R+u_L+u_C$。

（1）相量图分析法

RLC 串联电路，外加电压的有效值 U 可以用 u_R、u_L、u_C 的相量和求得，作出相量合成图如图 2-21（b）所示，或简化成图 2-21（c）的形式。

由相量合成图得：

$$U=\sqrt{U_R^2+(U_L-U_C)^2} \tag{2.26}$$

由电阻电路、电感电路、电容电路的电压与电流关系及相量合成图得：

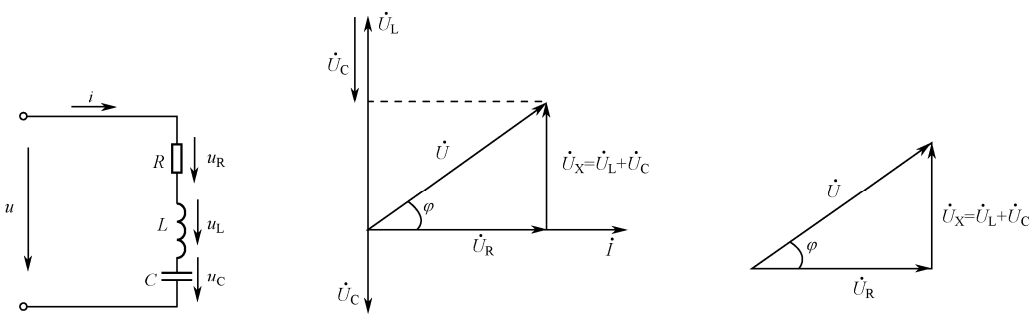
$$U=\sqrt{U_R^2+(U_L-U_C)^2}=\sqrt{(IR)^2+(IX_L-IX_C)^2}=I\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}$$

令 $|Z|=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}$，称 $|Z|$ 为电路的阻抗，单位也是欧姆（Ω），则

$$I=\frac{U}{|Z|} \tag{2.27}$$

图 2-21（b）中所示 $\dot{U}$ 与 $\dot{I}$ 的夹角 φ，即为总电压 u 与电流 i 之间的相位差。由相量图可得：

$$\varphi=\arctan\frac{U_L-U_C}{U_R}=\arctan\frac{X_L-X_C}{R} \tag{2.28}$$



（a）电路图　　（b）相量图　　（c）电压三角形

图 2-21　RLC 串联电路

图 2-21（c）表征了总电压与有功电压、无功电压之间关系，这个三角形称为电压三角形。

如果把电压三角形的各边同除以电流相量即得到表征电路阻抗与电阻、电抗之间关系的三角形，称为阻抗三角形，如图 2-22 所示。

复阻抗的阻抗角φ即为电压与电流的相位差φ。求出了复阻抗的阻抗角，就求得了该电路电压与电流的相位差φ。在电流频率一定时，电压与电流的大小关系、相位关系、电路性质完全由负载的电路参数决定。下面对阻抗角φ进行讨论。

①如果 $X_L > X_C$，即 $U_L > U_C$，则$\varphi > 0°$，电压 u 超前于电流 i 角度φ，电感的作用大于电容的作用，电路呈电感性，如图 2-21（b）所示。

②如果 $X_L < X_C$，即 $U_L < U_C$，则$\varphi < 0°$，电压 u 滞后于电流 i 角度φ，电容的作用大于电感的作用，电路呈电容性，如图 2-23（a）所示。

③如果 $X_L = X_C$，即 $U_L = U_C$，则$\varphi = 0$，电压 u 与电流 i 同相位，电感电压 u_L 与电容电压 u_C 正好平衡，互相抵消，电路呈电阻性，如图 2-23（b）所示。

应注意：在分析与计算交流电路时必须时刻具有交流的概念，首先要有相位的概念。在串联电路中，电源电压相量等于各参数上的电压相量之和，而电源电压的有效值不等于各参数上的电压有效值之和，即 $U \neq U_R + U_L + U_C$。

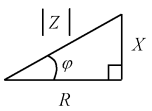
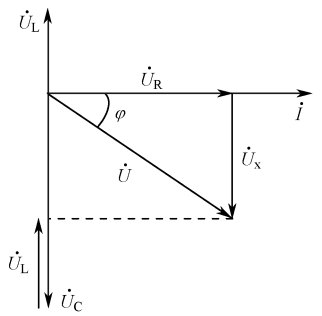
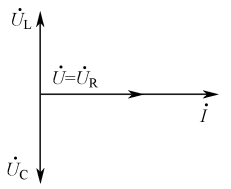


图 2-22　阻抗三角形



（a）电路呈容性时的相量图



（b）电路呈电阻性时的相量图

图 2-23　电容性与电阻性电路的相量图

（2）相量运算分析法

设电流瞬时值表示式为 $i = I_m \sin \omega t$，相量表示式为 $\dot{I} = I \angle 0^\circ$。

若 u_R、u_L、u_C 用相量表示，则

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C \tag{2.29}$$

将 $\dot{U}_R = \dot{I}R$，$\dot{U}_L = \mathrm{j}\dot{I}X_L$，$\dot{U}_C = -\mathrm{j}\dot{I}X_C$ 代入上式中得：

$$\dot{U} = \dot{I}R + \mathrm{j}\dot{I}X_L - \mathrm{j}\dot{I}X_C = \dot{I}\left[R + \mathrm{j}(X_L - X_C)\right] = \dot{I}(R + \mathrm{j}X) = \dot{I}Z$$

式中，$X = X_L - X_C = \omega L - \dfrac{1}{\omega C}$，称为电抗，是感抗与容抗之差，单位是欧姆（Ω）。

$Z = R + \mathrm{j}(X_L - X_C) = R + \mathrm{j}X = |Z| \angle \varphi$，称为复阻抗，是复数，其单位也是欧姆（Ω）。所以 $\dot{U} = \dot{I}Z$ 也可表示为：

$$\dot{U} = \dot{I}\,|Z| \angle \varphi \tag{2.30}$$

$\dot{U} = \dot{I}Z$ 表达式与直流电路中的欧姆定律 $U = RI$ 有相似的形式，称之为正弦交流电路的欧姆定律的相量形式，它既表达了电路中电压与电流的有效值之间的关系，也反映出了电压与电流的

相位关系。

由图 2-22 所示的阻抗三角形得：$R=|Z|\cos\varphi$，$X=|Z|\sin\varphi$。

2. RLC 串联正弦交流电路中的功率和能量转换

在分析单一元件的交流电路时，已知电阻元件消耗电能，电感、电容元件不消耗电能，仅与电源间进行能量交换。下面以 RLC 串联电路为例，分析正弦交流电路能量交换的情况及能量计算关系式。

（1）平均功率（也称为有功功率，简称为功率）

在 RLC 串联电路中，仍然只有电阻消耗功率，所以电路的平均功率为：

$$P=I^2R=I(IR)=IU_R$$

由电压三角形得 $U_R=U\cos\varphi$，则

$$P=IU\cos\varphi \tag{2.31}$$

某一电路的平均功率大小表示了这个电路消耗功率的大小，如 60W 灯泡是指灯泡的平均功率为 60W。

式（2.31）中 $\cos\varphi$称为功率因数，φ角又称为功率因数角。因为$-90°\leqslant\varphi\leqslant90°$，所以$0\leqslant\cos\varphi\leqslant1$，有功功率一般小于电压和电流有效值的乘积 UI。

（2）无功功率

由于电路中有储能元件电感和电容，它们不消耗能量，但与电源进行能量的交换，一般交流电路的无功功率是电路中全部电感和电容无功功率的代数和。应当注意，无论是串联还是并联电路，电感和电容的瞬时功率符号始终相反，所以电路的无功功率为：

$$Q=Q_L-Q_C=I^2X_L-I^2X_C=IU_L-IU_C=I(U_L-U_C)$$

由图 2-21（c）电压三角形可得（U_L-U_C）$=U\sin\varphi$，则

$$Q=IU\sin\varphi \tag{2.32}$$

无功功率可正可负，对于感性电路，$Q=Q_L-Q_C>0$；对于容性电路，$Q=Q_L-Q_C<0$。为计算方便，取电感元件的无功功率为正值，电容元件的无功功率为负值。

（3）视在功率

在 RLC 串联交流电路中，端电压的有效值 U 和电流有效值 I 的乘积称为视在功率，用符号 S 表示，即

$$S=UI \tag{2.33}$$

视在功率用于表示发电机、变压器等电气设备的容量，交流电气设备是按照规定的额定电压 U_N 和额定电流 I_N 来设计和使用的，电源向电路提供的容量就是额定电压与额定电流的乘积，称为额定视在功率 S_N，表示为 $S_N=U_NI_N$。

视在功率的单位是伏安（VA）或千伏安（kV·A）。

有功功率 P、无功功率 Q、视在功率 S 各代表不同的意义，各采取不同的单位，三者的关系式为：

$$\left.\begin{aligned}P&=UI\cos\varphi=S\cos\varphi\\Q&=UI\sin\varphi=S\sin\varphi\\S&=\sqrt{P^2+Q^2}\end{aligned}\right\} \tag{2.34}$$

三者之间的关系也可用三角形表示，称为功率三角形，如图 2-24 所示。功率不是相量，三角形的三条边均不带箭头。

对于同一个交流电路，阻抗三角形、电压三角形和功率三角形是相似直角三角形，把这三个三角形画在一起如图 2-25 所示。

借助于三个三角形可帮助分析、记忆、求解角度。计算某一负载电路的功率因数可以用以下公式计算：

$$\cos\varphi=\frac{P}{S}=\frac{U_{\mathrm{R}}}{U}=\frac{R}{|Z|} \tag{2.35}$$

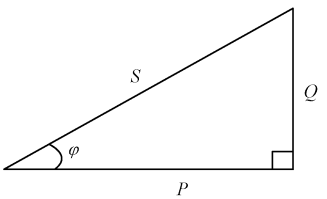


图 2-24　功率三角形

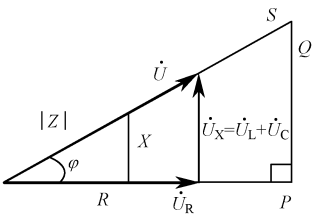


图 2-25　阻抗三角形、电压三角形和功率三角形

应当注意，根据电路的功率守恒定律，电路中总的有功功率等于各部分有功功率之和，即 $P_{总}=\Sigma P=\Sigma I^2R$。总的无功功率等于各部分无功功率之和，即 $Q_{总}=\Sigma Q=\Sigma I^2X_{\mathrm{L}}-\Sigma I^2X_{\mathrm{C}}$。但是，一般情况下总的视在功率不等于各部分视在功率之和，即 $S\neq S_1+S_2$。



应用举例 —— 练一练

例 2.6　电阻 R=22Ω，电感 L=0.6H 的线圈与电容 C=63.7μF 串联后，接到 220V、50Hz 的交流电源上，求电路中的电流、电路的功率因数、有功功率、无功功率和视在功率。

解　感抗、容抗、阻抗分别为：

$$X_{\mathrm{L}}=2\pi fL=2\times3.14\times50\times0.6=188.4\ （\Omega）$$

$$X_{\mathrm{C}}=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{2\times3.14\times50\times63.7\times10^{-6}}=50\ （\Omega）$$

$$|Z|=\sqrt{R^2+(X_{\mathrm{L}}-X_{\mathrm{C}})^2}=\sqrt{22^2+(188.4-50)^2}=140.1\ （\Omega）$$

电流的有效值为：

$$I=\frac{U}{|Z|}=\frac{220}{140.1}=1.57\ （\mathrm{A}）$$

电路的功率因数为：

$$\cos\varphi=\frac{R}{|Z|}=\frac{22}{140.1}=0.157$$

有功功率为：

$$P=I^2R=1.57^2\times22=54\ （\mathrm{W}）$$

无功功率为：

$$Q=I^2(X_{\mathrm{L}}-X_{\mathrm{C}})=1.57^2\times(188.4-50)=341.1\ （\mathrm{var}）$$

视在功率为：

$$S = UI = 220 \times 1.57 = 345.4 \text{ （V•A）}$$

例 2.7　在 RLC 串联电路中，已知电阻 R=10kΩ，电感 L=5mH，电容 C=0.001μF，接到端电压 $u = 10\sqrt{2}\sin 10^6 t$ V 的电源上。试求：（1）感抗、容抗和复阻抗；（2）电路中的电流 i；（3）电阻、电感、电容的电压瞬时值表达式；（4）绘出相量图并判断电路性质；（5）求功率 P 和 Q。

解　（1）感抗为：$X_L = \omega L = 10^6 \times 5 \times 10^{-3} = 5$ （kΩ）

容抗为：$X_C = \dfrac{1}{\omega C} = \dfrac{1}{10^6 \times 0.001 \times 10^{-6}} = 1$ （kΩ）

复阻抗为：$Z = R + \mathrm{j}(X_L - X_C) = 10 + \mathrm{j}(5-1) = 10.77\angle 21.8^\circ$ （kΩ）

（2）电压相量为：$\dot{U} = 10\angle 0^\circ$ （V）

电流相量为：$\dot{I} = \dfrac{\dot{U}}{Z} = \dfrac{10\angle 0^\circ \text{ V}}{10.77\angle 21.8^\circ \text{ k}\Omega} = 0.929\angle(-21.8^\circ)$ （mA）

电流瞬时值表示式为：$i = 0.929\sqrt{2}\sin(10^6 t - 21.8^\circ)$ （mA）

（3）电阻电压相量为：$\dot{U}_R = \dot{I}R = 0.929 \times 10^{-3}\angle(-21.8^\circ) \times 10 \times 10^3 = 9.29\ \angle(-21.8^\circ)$ （V）

电感电压相量为：$\dot{U}_L = \mathrm{j}\dot{I}X_L = \angle 90^\circ \times 0.929 \times 10^{-3}\ \angle(-21.8^\circ) \times 5 \times 10^3 = 4.65\angle(68.2^\circ)$ （V）

电容电压相量为：

$$\dot{U}_C = -\mathrm{j}\dot{I}X_C = \angle(-90^\circ) \times 0.929 \times 10^{-3}\ \angle(-21.8^\circ) \times 1 \times 10^3 = 0.929\angle(-111.8^\circ) \text{ （V）}$$

电阻、电感、电容的电压瞬时值表示式分别为：

$$u_R = 9.29\sqrt{2}\sin(10^6 t - 21.8^\circ) \text{ （V）}$$

$$u_L = 4.65\sqrt{2}\sin(10^6 t + 68.2^\circ) \text{ （V）}$$

$$u_C = 0.929\sqrt{2}\sin(10^6 t - 111.8^\circ) \text{ （V）}$$

（4）相量图如图 2-26 所示。判断电路性质，可从总电路阻抗角 φ 判断，也可以看复阻抗的虚部电抗 X，由于电抗 $X>0$，$\varphi>0$，电路呈电感性。从相量图上也可以看出 $\dot{U}$ 超前 $\dot{I}$。

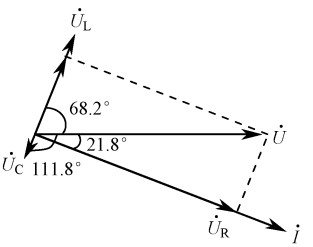


图 2-26　例 2.7 的相量图

（5）有功功率为：

$$P = UI\cos\varphi = 10 \times 0.929 \times 10^{-3} \times 0.93 = 8.6 \times 10^{-3}(\text{W})$$

无功功率为：

$$Q = UI\sin\varphi = 10 \times 0.929 \times 10^{-3} \times 0.37 = 3.4 \times 10^{-3}(\text{var})$$

3. 串联谐振电路

在具有电感元件和电容元件的电路中，电路两端的电压与电路中的电流一般是不同相位的。如果调节电路的参数或电源的频率，使电压与电流同相位，这时电路中就发生谐振现象。电路中的谐振现象在电子技术上有很大的应用价值，但在电力系统中谐振会带来严重的危害。

（1）串联谐振的条件及谐振频率

在如图 2-21（a）所示的 RLC 串联电路中，当 X_L=X_C 时，X=X_L−X_C=0，φ=0，总电压与电流同相位，电路呈电阻性，这种情况称为电路发生了谐振现象。由于电路中电感、电容、电

阻串联，所以称为串联谐振。

由于当 $X_L=X_C$，即 $2\pi fL=\dfrac{1}{2\pi fC}$ 时发生串联谐振，所以谐振频率为：

$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.36}$$

f_0 称为电路的固有频率，由电路自身参数 L、C 决定。当电源频率 f 与电路固有频率 f_0 相等时，电路发生谐振。可见只要改变电路参数 L、C 或电源频率 f 都可使电路发生谐振或消除谐振。

（2）串联谐振的特征

① 电路的阻抗最小，电流最大。谐振时 $X_L=X_C$，谐振时电路的阻抗为：

$$Z=Z_0=R+\mathrm{j}(X_L-X_C)=R$$

谐振时电流值为：

$$I=I_0=\frac{U}{|Z_0|}=\frac{U}{R}$$

（2）谐振时总电压与电流同相位（$\varphi=0$），电阻呈电阻性。有功功率 $P=UI\cos\varphi=UI$，表示电源功率全部消耗在电阻上，总的无功功率 $Q=UI\sin\varphi=0$，表示电源与电路之间没有能量的交换。但 $Q_L=Q_C$，表明能量的交换是在电感与电容之间进行的，即当电容释放电场能量时，这些能量正好被线圈吸收建立磁场；而当线圈释放磁场能量时，这些能量又正好被电容器吸收建立电场。

（3）谐振时，$X_L=X_C$，$U_L=U_C$，u_L 与 u_C 大小相等，相位相反，互相抵消，所以电源电压 $U=U_R$。

（4）当 $X_L=X_C>>R$ 时，$U_L=U_C>>U_R=U$，电感上电压与电容上电压大小相等，并远远高于电源电压 U，所以串联谐振也称为电压谐振。

串联谐振在电力工程中是有害的，由于 U_L 和 U_C 都高于电源电压 U，会击穿线圈和电容器的绝缘，在电力工程中应避免发生串联谐振。但在无线电工程中，常利用串联谐振在电感或电容元件上获得高于电源电压几十倍或几百倍的电压，以达到选频的目的。

在工程上，常把谐振时电容电压或电感电压与总电压之比，称为电路的品质因数，用符号 Q 表示：

$$Q=\frac{U_L}{U}=\frac{U_C}{U}=\frac{\omega_0 L}{R}=\frac{1}{\omega_0 CR} \tag{2.37}$$

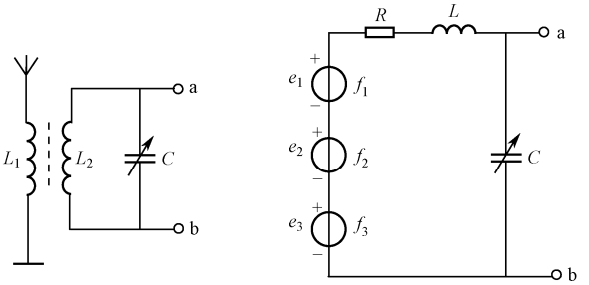
品质因数 Q 是一个无量纲的物理量。它的意义是，在谐振时电感或电容元件上的电压是电源电压的 Q 倍。例如，Q=100，U=4V，谐振时电容或电感上的电压高达 400V。Q 值越大，电路的选频特性越好。



应用举例 —— 练一练

例 2.8 图 2-27（a）所示为一个收音机天线输入回路，L_1 是天线线圈，L_2、C 组成串联谐振电路，其等效电路如图 2-27（b）所示。若电容调至 C=300pF，线圈电感 L=0.3mH，电阻 R=10Ω，输入端加一个谐振信号电压 U=1mV。试求：（1）电路的固有频率 f_0；（2）谐振电流 I_0；（3）电

路品质因数 Q；（4）电容电压 U_C；（5）若 U 不变，但频率偏离 f_0 的值 10%（即 f=（1+10%）f_0）时 U_C'是多少？



（a）电路图　　（b）等效电路

图 2-27　收音机天线原理图

解　（1）电路的固有频率为：$f_0=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{0.3\times10^{3}\times300\times10^{-12}}}=531$（kHz）

（2）谐振电流为：$I_0=\dfrac{U}{R}=\dfrac{1\times10^{-3}}{10}=0.1$（mA）

（3）品质因数：$Q=\dfrac{\omega_0 L}{R}=\dfrac{2\pi f_0 L}{R}=\dfrac{2\pi\times531\times10^{3}\times0.3\times10^{-3}}{10}=100$

（4）电容电压为：$U_C=QU=100\times1\times10^{-3}=100$（mV）

（5）当 $f=(1+10\%)f_0=1.1\times531\times10^{3}=584\ \text{kHz}$ 时

$$X_{\mathrm{L}}=2\pi fL=2\pi\times584\times10^{3}\times0.3\times10^{-3}=1101(\Omega)$$

$$X_{\mathrm{C}}=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{2\pi\times584\times10^{3}\times300\times10^{-12}}=908(\Omega)$$

$$|Z|=\sqrt{R^2+(X_{\mathrm{L}}-X_{\mathrm{C}})^2}=\sqrt{10^2+(1101-908)^2}=193.3(\Omega)$$

$$U_{\mathrm{C}}'=\frac{U}{|Z|}X_{\mathrm{C}}=\frac{1}{193.3}\times908=4.7(\mathrm{mV})$$

此时电容两端输出电压 U_C'比谐振时的输出电压 U_C 下降了

$$\frac{U_{\mathrm{C}}-U_{\mathrm{C}}'}{U_{\mathrm{C}}}\times100\%=\frac{100-4.7}{100}\times100\%=95.3\%$$

该电路由于品质因数较高，选频效果明显。



实践操作 —— 做一做

（1）RLC 串联交流电路的测试

① 在实验线路板上按图 2-21（a）所示电路连接线路，电路中的电阻 R=100Ω，L=47mH，C=10μF，交流电源用函数信号发生器代替，U=5V，频率分别为 50Hz、1kHz、10kHz。

② 用双踪示波器的 CH1 测试电源两端的电压信号，分别用 CH2 测试电阻、电感、电容两端的电压信号，读出数据，填入表 2-6 中。

③ 用 CH2 测试电阻两端的电压信号，选择合适的水平和垂直标度，将触发电平设置到 CH1 上，即可得到相应的电压与电流的波形。

④ 用交流毫伏表测量频率分别为 50Hz、1kHz、10kHz 时的电源、电阻、电感、电容两端的电压，读出数据填入表 2-6 中。

表 2-6　RLC 串联电路的电压测试

测 试 项 目	频　　率	用示波器测量的最大值	计算有效值	交流毫伏表测量值
电源电压 U	f=50Hz			
	f=1kHz			
	f=10kHz			
电阻电压 U_R	f=50Hz			
	f=1kHz			
	f=10kHz			
电感电压 U_L	f=50Hz			
	f=1kHz			
	f=10kHz			
电容电压 U_C	f=50Hz			
	f=1kHz			
	f=10kHz			

（2）串联谐振电路的测试

① 测试电路如图 2-21（a）所示，电路中的电阻 R=100Ω，L=47mH，C=10μF，交流电源用函数信号发生器代替，U=5V，保持不变。

② 找出电路的谐振频率 f_0，其方法是：将毫伏表接在 R 的两端，令信号源的频率由小逐渐变大（注意要维持信号源的输出幅度不变），当 U_R 的读数为最大时，读得频率计上的频率值即为电路的谐振频率 f_0，并测量 U_C 与 U_L 之值（注意及时更换毫伏表的量限）。

③ 在谐振点两侧，按频率递增或递减 50Hz 或 100Hz，依次各取 8 个测量点，逐点测出 U_R、U_L、U_C 的值，将数据记入表 2-7 中。

表 2-7　串联谐振电路的测量

频　　率												
电阻电压 U_R												
电感电压 U_L												
电容电压 U_C												

测量时应注意：RLC 串联电路谐振测试时，测试频率点的选择应在靠近谐振频率附近多取几点。在变换频率测试前，应调整信号输出幅度（用示波器监视输出幅度），使其维持在 5V；测量 U_C 和 U_L 数值前应将毫伏表的量限改大，而且在测量 U_L 与 U_C 时交流毫伏表的“＋”端应接 C 与 L 的公共点，其接地端应分别触及 L 和 C 的另一端；在测试过程中，信号源的外壳应与毫伏表的外壳绝缘（不共地）。如能用浮地式交流毫伏表测量，则效果更佳。



问题研讨 —— 想一想

（1）为什么 RLC 串联电路中，$U \neq U_R + U_L + U_C$？

（2）三个同样的白炽灯，分别与电阻、电感、电容串联后接到相同的交流电源上，如果 $R=X_L=X_C$，那么三个白炽灯亮度是否一样？为什么？如果把它们改接在直流电源上，灯的亮度各有什么变化？

2.3.2　感性负载与电容器并联电路的分析与测试



现象观察 —— 看一看

按图 2-28 所示电路连接线路，特别要注意功率表的接法。图中的灯泡为“220V，25W”的白炽灯，用万用表测量其电阻 R；L 为铁芯线圈，C=4.7μF。合上 S_1，观察 S_2 断开与闭合时，各电表的读数变化情况。

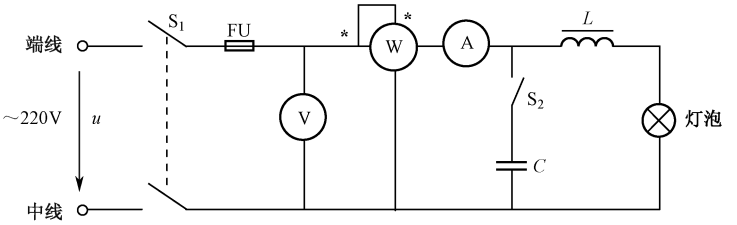


图 2-28　交流并联电路的测试



知识链接 —— 学一学

一个实际线圈与电容器并联也是一种常用的电路。例如，为了提高线路的功率因数，往往将电容器与日光灯或异步电动机并联运行；在电子线路的晶体管振荡器中用这种电路作为振荡回路。

1. 感性负载与电容器并联正弦交流电路中的电压、电流

在图 2-29（a）所示线圈与电容器并联电路中，设电源电压 u 为已知，通过线圈的电流有效值为：

$$I_1 = \frac{U}{|Z_1|} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

i_1 比 u 滞后 φ_1 角，其值为：

$$\varphi_1 = \arctan\frac{X_L}{R}$$

通过电容支路的电流有效值为：

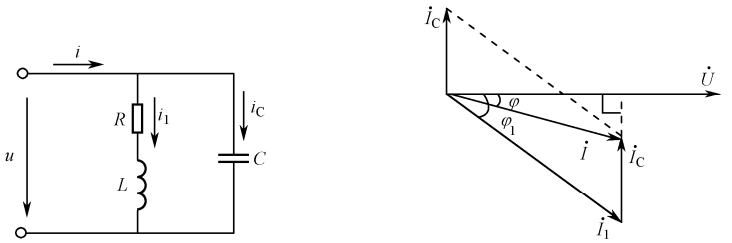
$$I_C = \frac{U}{X_C}$$

i_C 比 u 导前 $\frac{\pi}{2}$ 角。

总电流的瞬时值为：

$$i = i_1 + i_C$$

在并联电路中，一般选择电压为参考正弦电量比较方便，然后绘出各电流的相量图，如图 2-29（b）所示。从相量图上可以求出总电流与支路电流的量值关系，以及总电流与电压之间的相位关系。



（a）电路图　　（b）相量图

图 2-29　感性负载与电容器并联交流电路

把通过线圈的电流 $\dot{I}_1$ 分解为两个分量：与电压同相的电流分量（大小为：$I_1\cos\varphi_1$）称为电流 $\dot{I}_1$ 的有功分量或有功电流；垂直于电压相量的电流分量（大小为：$I_1\sin\varphi_1$）称为电流 $\dot{I}_1$ 的无功分量或无功电流。由 I_1、$I_1\cos\varphi_1$、$I_1\sin\varphi_1$ 组成一个直角三角形，称为 $\dot{I}_1$ 的电流三角形。电流三角形的底角 φ_1 是电流 $\dot{I}_1$ 与电压 $\dot{U}$ 的相位差。

流过电容支路的电流 $\dot{I}_C$ 导前于电压 $\frac{\pi}{2}$，所以 $\dot{I}_C$ 的有功分量为零，而无功分量就是 I_C。

由相量图可得：

$$I = \sqrt{(I_1\cos\varphi_1)^2 + (I_1\sin\varphi_1 - I_C)^2} \tag{2.38}$$

总电流滞后于电压的相位差 φ 可由下式求得：

$$\varphi = \arctan\frac{I_1\sin\varphi_1 - I_C}{I_1\cos\varphi_1} \tag{2.39}$$

由式（2.39）及相量图 2-29（b）可看出，当 $I_1\sin\varphi_1 > I_C$ 时，总电流 $\dot{I}$ 滞后于电压 $\dot{U}$，整个电路为感性负载；当 $I_1\sin\varphi_1 < I_C$ 时，总电流 $\dot{I}$ 导前于电压 $\dot{U}$，整个电路为容性负载；当 $I_1\sin\varphi_1 = I_C$ 时，总电流 $\dot{I}$ 与电压 $\dot{U}$ 同相，整个电路为阻性负载，此时总电流 I 的数值最小，而总的功率因数为最大，$\cos\varphi=1$。

从相量图中比较 $\dot{I}$ 与 $\dot{I}_1$ 的大小，发现并联电路的总电流 I 比线圈支路的电流 I_1 还要小。总电流小于并联负载中的电流，这在直流电路中是不可能的，但在交流电路中却是可能的，而且不难理解：因为线圈支路的电流 $\dot{I}_1$ 的无功分量与电容支路的电流 $\dot{I}_C$ 的无功分量在相位上相差π角，即它们是反相的，因而在并联后的总电流中有一部分无功电流互相抵消了。

2. 感性负载与电容器并联电路中的功率

线圈支路的有功功率 $P_1=UI_1\cos\varphi_1$，无功功率 $Q_L=UI_1\sin\varphi_1$；电容器不取用有功功率，它的无功功率 $Q_C=UI_C$，故，电路的总有功功率就等于线圈支路的有功功率：

$$P=UI\cos\varphi=UI_1\cos\varphi_1 \tag{2.40}$$

由式（2.38）及图 2-29（b）可以看出，因为 $I<I_1$，所以 $\cos\varphi>\cos\varphi_1$，表示并联电路总的功率因数大于线圈的功率因数，这从相量图中也可以看出。一般地，电感性负载并联适当的电容，可以提高电路总的功率因数，这在实用上有很重要的经济意义。

并联电路总的无功功率为：

$$Q=Q_L-Q_C=I_1^2X_L-I_C^2X_C=UI\sin\varphi_1 \tag{2.41}$$

由式（2.41）可知 $Q<Q_L$，即总的无功功率比线圈支路的无功功率要小。这是因为线圈支路的电流 i_1 的无功电流与电容支路的无功电流 i_C 反相，一部分无功电流在线圈与电容器之间流通，也就有一部分无功功率在线圈与电容器之间相互补偿，即在它们之间相互吞吐能量；这样，电路与电源之间能量吞吐的规模只剩下 Q_L-Q_C 了。电路中总的无功功率的减小，就意味着电路的功率因数提高。

3. 并联谐振电路

在电子线路中也广泛应用的实际线圈与电容器组成的并联谐振电路，如图 2-29（a）所示。如上所述，当线路中的无功电流全部为电容电流所补偿时，即 $I_1\sin\varphi_1=I_C$ 时，总电流与电压同相，整个电路呈纯电阻性，这种状态称为并联谐振。这种并联谐振电路的谐振频率 f_0 可求得如下：

$$f_0=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}-\frac{R^2}{L^2}} \tag{2.42}$$

一般线圈的电阻 R 很小，可忽略不计，于是上式就成为：

$$f_0\approx\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.43}$$

并联谐振的特点是：总电流最小，阻抗值最大。即并联谐振时呈现高阻抗，故可与高内阻的电源配合使用；支路的谐振电流很大，是总电流的 Q 倍，一般 Q 值为 100 左右。

并联谐振在无线电技术和工业电子技术中也常用到，例如，并联谐振高阻抗的特点可用于制成选频放大器、振荡器、滤波器等。

4. 电路的功率因数的提高

在交流供电线路上，负载是多种多样的，负载功率因数的大小取决于负载的性质，实际用电器的功率因数都在 1 和 0 之间。白炽灯和电阻炉是纯电阻负载，只消耗有功功率，其功率因数为 1。日光灯是感性电路，功率因数为 0.45~0.6 左右。异步电动机可等效看成由电阻和电感组成的感性负载，满载时功率因数达 0.9 左右，空载时会降到 0.2。交流电焊机的功率因数在 0.3~0.4 左右。由于电力系统中接有大量的感性负载，线路的功率因数小于 1，发电厂在发出有功功率的同时也输出无功功率与负载间进行能量的交换，这样就会产生以下两个问题：

一是电源容量不能得到充分利用，发电设备的容量是由其视在功率 $S_N=U_NI_N$ 决定的，它表示这台发电机能向外电路提供的最大功率。负载能获得多少功率取决于负载的性质，发电设备向外电路输出的有功功率为 $P_N=U_NI_N\cos\varphi=S_N\cos\varphi$，如果所带负载 $\cos\varphi<1$，则发电设备输出有功功率 $P<S_N$。负载功率因数越低，发电设备输出的有功功率越低，发电设备的容量就越不能充分利用。二是增加线路和发电机绕组的功率损耗，当发电机的电压及对负载输送的有功功率一定时，线路电流 I 为 $I=\dfrac{P}{U\cos\varphi}$，功率因数 $\cos\varphi$ 越低，线路电流 I 越高，线路和发电机绕组上的功率损耗越大。因此，提高供电线路的功率因数，对电力工业的建设和节约电能有重大意义。我国电力部门规定新建和扩建的电力用户功率因数不应低于 0.9，否则不予供电。

功率因数不高，根本原因就是由于感性负载的存在，而感性负载本身需要一定的无功功率。一般来说，负载（设备）本身的功率因数是不能改变的，提高功率因数是在保证负载正常工作的前提下，提高整个电路的功率因数。提高电路的功率因数的途径很多，其中一个最常用的方法就是在感性负载的两端并联电容量适当的电容器。这种方法不会改变负载原来的工作状态，负载取用的电流、有功功率以及负载本身的功率因数仍和原来一样，但是负载的一部分无功电流、无功功率从电容支路得到了补偿，从而使线路的功率因数提高了，总电流减小了，电源设备得到了充分利用。因此变电室内常并联有专用的电力电容器，用来提高该变电室所供负载线路的功率因数。

用并联电容器提高功率因数，一般提高到 0.9 左右就可以了，因为要补偿到功率因数接近 1 时，所需的电容量太大，反而不经济。

设需求的 $\cos\varphi$ 为已知，由图 2-29（b）相量图可容易地分析求得应并联的电容为：

$$C=\frac{P}{\omega U^2}(\tan\varphi_1-\tan\varphi) \qquad (2.44)$$



应用举例 —— 练一练

例 2.9 有一台发电机的额定容量 S_N=10kV·A，额定电压 U_N=220V，角频率 ω=314rad/s，给一负载供电，该负载的有功功率 P=5kW，功率因数 $\cos\varphi_1$=0.5。试求：（1）该负载所需的电流值，该负载是否超载？（2）在负载不变的情况下，将一个电容器与负载并联，使供电系统的功率因数提高到 0.85，问需要并联多大的电容器？此时线路电流是多少？

解 （1）负载电流为：$I=\dfrac{P}{U\cos\varphi_1}=\dfrac{5\times10^3}{220\times0.5}=45.45$（A）

发电机的额定电流为：$I_N=\dfrac{S_N}{U_N}=\dfrac{10\times10^3}{220}=45.45$（A）

可见，发电机正好满载。

（2）由式（2.44）计算并联电容器的电容值。

当 $\cos\varphi_1$=0.5 时，$\tan\varphi_1$=1.732；当 $\cos\varphi$=0.85 时，$\tan\varphi$=0.62，则

$$C=\frac{P}{\omega U^2}(\tan\varphi_1-\tan\varphi)=\frac{5\times10^3}{314\times220^2}\times(1.732-0.62)=365.8\ (\mu F)$$

并联电容器后线路的电流为：$I=\dfrac{P}{U\cos\varphi_2}=\dfrac{5\times10^3}{220\times0.85}=26.7$（A）

并联电容器后线路的电流由 45.45A 下降到 26.7A，发电设备还可多并联负载。

*5. 复杂正弦交流电路的分析

以上对简单的正弦交流电路进行了分析，对复杂的正弦交流电路，如果构成电路的电阻、电感、电容等元件都是线性的，电路中正弦电源都是同频率的，那么电路中各部分的电压和电流仍将是同频率的正弦电量，可用相量法进行分析。

与相量形式的欧姆定律及基尔霍夫定律类似，只要把电路中的无源元件表示为复阻抗或复导纳（复阻抗的倒数），所有正弦电量均用相量表示，那么讨论直流电路时所采用的各种网络分析方法、原理、定理都完全适用于线性正弦交流电路，下面通过例题来讨论。



应用举例 —— 练一练

例 2.10　在图 2-30（a）所示的电路中，已知：$\dot{U}_S=50\angle0^\circ$ V，$\dot{I}_S=10\angle30^\circ$ A，X_L=5Ω，X_C=3Ω。求图中的$\dot{U}$。

解　（1）用电源等效变换求解

先将$\dot{U}_S$与 jX_L 串联的电压源，变换成$\dot{I}_{S1}$与 jX_L 并联的电流源，如图 2-30（b）所示。其中

$$\dot{I}_{S1}=\frac{\dot{U}_S}{\mathrm{j}X_L}=\frac{50\angle0^\circ}{\mathrm{j}5}=10\angle(-90^\circ)\ (\mathrm{A})$$

再将电流源$\dot{I}_S$与$\dot{I}_{S1}$并联，得到电流源$\dot{I}_{S2}$，如图 2-30（c）所示。

$$\dot{I}_{S2}=\dot{I}_{S1}+\dot{I}_S=10\angle(-90^\circ)+10\angle30^\circ=10\angle(-30^\circ)\ (\mathrm{A})$$

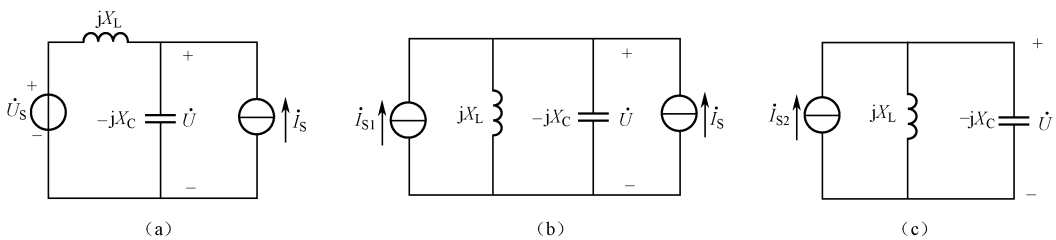


图 2-30　例 2.10 图

计算等效复阻抗 Z

$$Z=\frac{\mathrm{j}X_L(-\mathrm{j}X_C)}{\mathrm{j}X_L-\mathrm{j}X_C}=\frac{\mathrm{j}5\times(-\mathrm{j}3)}{\mathrm{j}5-\mathrm{j}3}=-\mathrm{j}7.5\ (\Omega)$$

所以

$$\dot{U}=\dot{I}_SZ=10\angle(-30^\circ)\times(-\mathrm{j}7.5)=75\angle(-120^\circ)\ (\mathrm{V})$$

（2）用叠加原理求解

电压$\dot{U}$是$\dot{U}_S$单独作用时的$\dot{U}'$（如图 2-31（a）所示）和$\dot{I}_S$单独作用时的电压$\dot{U}''$（如图 2-31（b）所示）的代数和。

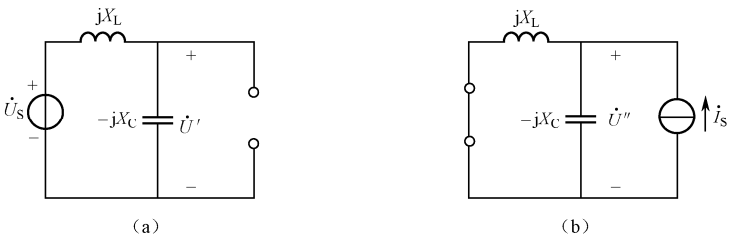


图 2-31　例 2.10 图

对图 2-31（a）有：

$$\dot{U}' = \frac{-\mathrm{j}X_\mathrm{C}}{\mathrm{j}X_\mathrm{L} - \mathrm{j}X_\mathrm{C}}\dot{U}_\mathrm{S} = \frac{-\mathrm{j}3}{\mathrm{j}5 - \mathrm{j}3} \times 50\angle 0^\circ = -75\angle 0^\circ \ （\mathrm{V}）$$

对图 2-31（b）有：

$$\dot{U}'' = \frac{\mathrm{j}X_\mathrm{L}(-\mathrm{j}X_\mathrm{C})}{\mathrm{j}X_\mathrm{L} - \mathrm{j}X_\mathrm{C}}\dot{I}_\mathrm{S} = \frac{\mathrm{j}5 \times (-\mathrm{j}3)}{\mathrm{j}5 - \mathrm{j}3} \times 10\angle 30^\circ = 75\angle(-60^\circ) \ （\mathrm{V}）$$

所以

$$\dot{U} = \dot{U}' + \dot{U}'' = -75\angle 0^\circ + 75\angle 60^\circ = 75\angle(-120^\circ) \ （\mathrm{V}）$$

例 2.11　在图 3-32 所示的电路中，已知 $\dot{U}_{\mathrm{S1}} = 100\angle 0^\circ \mathrm{V}$，$\dot{U}_{\mathrm{S2}} = 100\angle 53.1^\circ \mathrm{V}$，$Z_1$=5+j5Ω，$Z_2$=5−j5Ω，$Z_3$=−j5Ω，分别用节点电压法和戴维南定理求图中的电流 $\dot{I}$。

解　（1）用节点电压法求解

列节点电压方程为

$$\dot{U}_{\mathrm{AB}} = \frac{\dfrac{\dot{U}_{\mathrm{S1}}}{Z_1} + \dfrac{\dot{U}_{\mathrm{S2}}}{Z_2}}{\dfrac{1}{Z_1} + \dfrac{1}{Z_2} + \dfrac{1}{Z_3}} = \frac{\dfrac{100\angle 0^\circ}{5 + \mathrm{j}5} + \dfrac{100\angle 53.1^\circ}{5 - \mathrm{j}5}}{\dfrac{1}{5 + \mathrm{j}5} + \dfrac{1}{5 - \mathrm{j}5} + \dfrac{1}{-\mathrm{j}5}} = 30 - \mathrm{j}10(\mathrm{V})$$

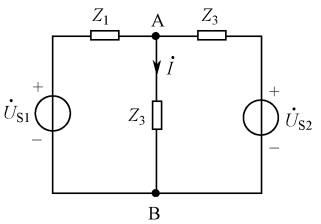


图 2-32　例 2.11 图

所以

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_{\mathrm{AB}}}{Z_3} = \frac{30 - \mathrm{j}10}{-\mathrm{j}5} = 6.32\angle 71.6^\circ(\mathrm{A})$$

（2）用戴维南定理求解

将电路分为有源二端网络和待求支路两部分，其有源二端网络如图 2-33（a）所示。求有源二端网络的端口 A、B 处的开路电压 $\dot{U}_{\mathrm{OC(AB)}}$。

$$\dot{U}_{\mathrm{OC(AB)}} = \frac{\dot{U}_{\mathrm{S1}} - \dot{U}_{\mathrm{S2}}}{Z_1 + Z_2}Z_2 + \dot{U}_{\mathrm{S2}} = \frac{100\angle 0^\circ - 100\angle 53.1^\circ}{5 + \mathrm{j}5 + 5 - \mathrm{j}5} \times (5 - \mathrm{j}5) + 100\angle 53.1^\circ = 40 + \mathrm{j}20(\mathrm{V})$$

即

$$\dot{U}'_{\mathrm{S}} = \dot{U}_{\mathrm{OC(AB)}} = 40 + \mathrm{j}20 \ （\mathrm{V}）$$

将有源二端网络中的所有电源去掉（按零值处理），如图 2-33（b）所示，计算端口 A、B 的等效内阻抗 Z'_0。

$$Z'_0 = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{(5 + \mathrm{j}5) \times (5 - \mathrm{j}5)}{(5 + \mathrm{j}5) + (5 - \mathrm{j}5)} = 5(\Omega)$$

将待求支路接入戴维南等效电路如图 2-33（c）所示，求 $\dot{I}$。

$$\dot{I}=\frac{\dot{U}_S'}{Z_0'+Z_3}=\frac{40+\mathrm{j}20}{5-\mathrm{j}5}=6.32\angle 71.6^{\circ}(\mathrm{A})$$

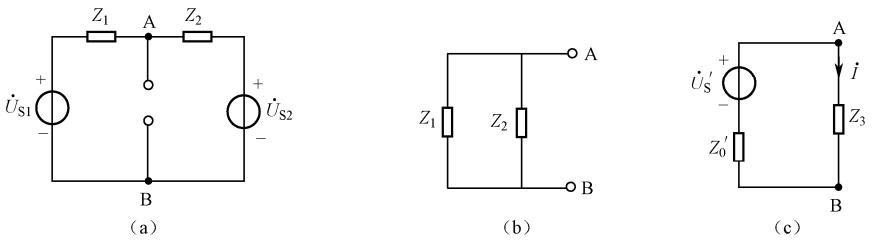


图 2-33　例 2.11 的图



实践操作 —— 做一做

荧光灯电路的安装与测试。

1. 荧光灯电路的结构

荧光灯电路由灯管、镇流器、启辉器、灯架和灯座等组成，如图 2-34 所示。

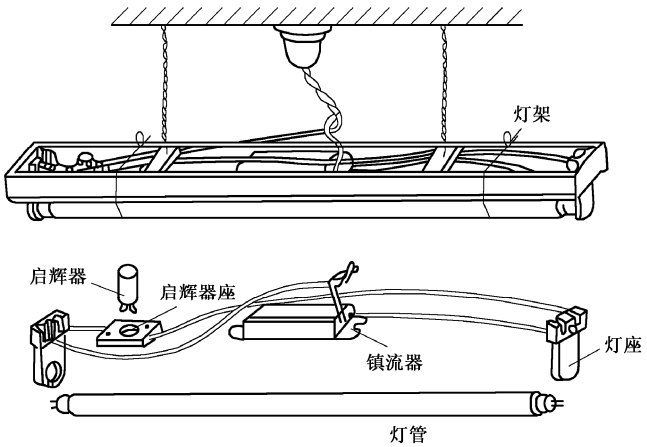


图 2-34　荧光灯的结构与布线

（1）灯管

灯管是内壁涂有荧光粉的玻璃管，灯管两端各有一个由钨丝绕成的灯丝，灯丝上涂有易发射电子的氧化物。管内抽成真空并充有一定的惰性气体和少量水银。惰性气体具有使灯管易发光和保护电极、延长寿命的作用。

（2）镇流器

镇流器是具有铁芯的线圈，在电路中起如下作用：在接通电源的瞬间，使流过灯丝的预热电流受到限制，以防止预热电流过大时烧断灯丝；日光灯启动时，和启辉器配合产生一个瞬时高电压，促使管内水银蒸气发生弧光放电，致使灯管管壁上的荧光粉受激而发光；灯管发光后，保持稳定放电，并将其两端电压和通过的电流限制在规定值内。镇流器的外形和结

构如图 2-35 所示。

（3）启辉器

启辉器的作用是在灯管发光前接通灯丝电路，使灯丝通电加热后又突然切断电路，类似一个开关。

启辉器的外壳是用铝或塑料制成的，壳内有一个充有氖气的小玻璃泡和一个纸质电容器，其结构如图 2-36 所示。纸质电容器的作用是避免启辉器的触片断开时产生的火花将触片烧坏，同时也防止管内气体放电时产生的电磁波辐射对电视机等家用电器的干扰。

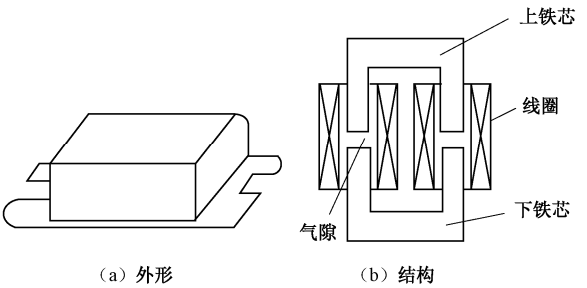


图 2-35　镇流器的外形和结构

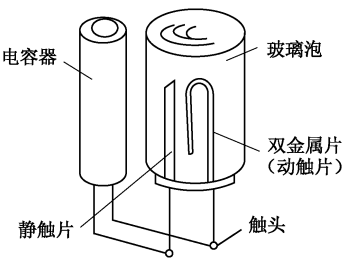


图 2-36　启辉器的结构

（4）灯架

灯架有木制和铁制两种，规格应配合灯管长度。

（5）灯座

灯座有开启式和弹簧式两种。大型的适用于 15W 及以上的灯管，小型适用于 6W、8W、12W 灯管。

2. 荧光灯的工作原理

荧光灯的工作原理如图 2-37 所示：接通电源后，电源电压（～220V）全部加在启辉器静触片和双金属片的两端，由于两触片间的高电压产生的电场较强，故使氖气游离而放电（红色辉光），放电时产生的热量使双金属片弯曲与静触片连接，电流经镇流器、灯管灯丝及启辉器构成通路。电流流过灯丝后，灯丝发热并发射电子，致使管内惰性气体电离，水银蒸发为水银蒸气。因启辉器玻璃泡内两触片连接，故电场消失，惰性气体也随之立即停止放电。随后，玻璃泡内温度下降，两金属片因此冷却而恢复原状，使电路断开，此时镇流器中的电流突变，故在镇流器两端产生一个很高的自感电动势，这个自感电动势和电源电压串联后，全部加到灯管两管，形成一个很强的电场，致使管内水银蒸气产生弧光放电，在弧光放电时产生的紫外线激发了灯管壁上的荧光粉，发出近似日光的灯光。灯管点燃后，由于镇流器的存在，灯管两端的电压比电源电压低得很多（具体数值与灯管功率有关，一般在 50~100V 范围内）不足以使启辉器放电，其触点不再闭合。

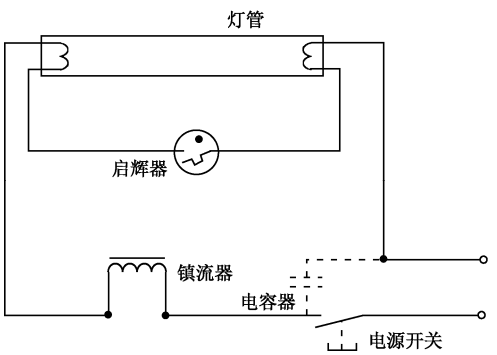


图 2-37　荧光灯电路原理图

3. 荧光灯电路的连接和观测

（1）荧光灯电路的连接和观测

① 按图 2-38 所示接线（电容器先不接），如所用镇流器有多个线圈或线圈引出线有其他标号时，请参照镇流器上的接线图接线。经教师检查同意后通电，荧光灯应立即发光。

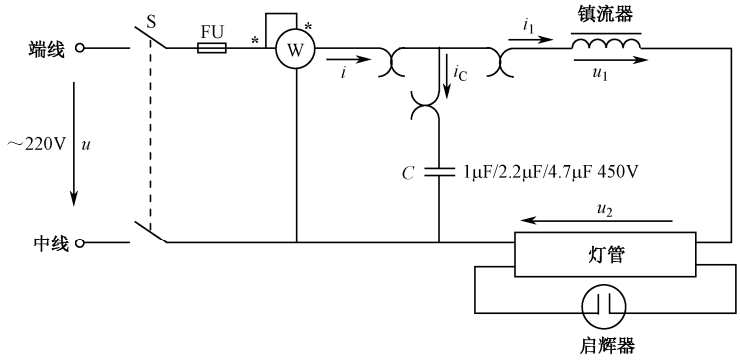


图 2-38　荧光灯电路的安装与测试

② 分别测量电路中各部分的电压 U、U_1、U_2 和电流 I、功率 P，测量时要注意仪表量程的选择。将测量数据记入表 2-8 中。

③ 根据测量结果计算出灯管消耗的功率 $P_2=U_2I$，镇流器消耗的功率 $P_1=P-P_2$ 和总功率因数，将数值填入表 2-8 中。

表 2-8　日光灯电路的观测

测　量　值					计　算　值		
P/W	I/A	U/V	U_1/V	U_2/V	P_2/W	P_1/W	cosφ

（2）并联电容器后的测量

① 将实验图 2-38 中的电容器 C 接上，逐步增加电容量，观察 I_1、I_C、I 及 P 的变化情况，将每次的电容量和相应各量的读数记在表 2-9 中。

② 分别计算上述情况时的电路功率因数，与并联电容器之前的功率因数相比较。

表 2-9　并联电容后的测量与计算

顺　序	电容量 C/μF	测　量　值					计　算　值
		U//V	I_1/A	I_C/A	I/A	P/W	cosφ
1	1						
2	2.2						
3	4.7						

应注意：安装荧光灯管时，应先将灯管管脚对准弹簧管座上的管脚孔，轻轻推压，然后再上好另一头管座。启辉器安装时不能有松动或接触不良现象，否则将影响灯管的启动。注意镇流器不要漏接，以免烧坏灯管。在接单相功率表时，应将电压线圈和电流线圈标有“*”

或“±”的符号端连在一起，与电源的端线相连，电压线圈的另一端与电源中线相连，电流线圈的另一端与负载相连。



问题研讨 —— 想一想

（1）并联电容器提高电路的功率因数，是否是通过提高感性负载的功率因数来提高的？为什么？此时增加了一条电流支路，那么电路的总电流是增加了还是减小了？此时感性负载上的电流和功率是否改变？为什么？

（2）根据相量图 2-29（b），试推导感性负载两端并联电容器以提高电路功率因数的补偿电容计算公式。

（3）能否将一个电容器与感性负载串联来提高电路的功率因数？为什么？

（4）为什么无论是串联电路还是并联电路，其总的视在功率都不等于各元件视在功率之和？

任务 2.4　三相正弦交流电路的分析与测试



任务描述

三相制供电比单相制供电更有优越性，例如，三相交流发电机比同样尺寸的单相交流发电机输出功率大；在相同条件下输送同样大的功率，三相输电线比单相输电线节省材料，因此，电力系统广泛采用三相制供电。本任务研究三相对称电动势的产生、三相电源的连接及三相电源的测试，三相负载的星形连接、三角形连接电路中的线电压与相电压关系、线电流与相电流的关系，三相电功率及测试。



任务目标

了解三相对称电动势的产生，掌握三相电源星形连接时线电压与相电压之间的关系，三相对称负载星形和三角形连接时的计算（包括相电压、线电压、相电流、线电流和三相电功率），理解三相四线制电路的中线作用，能正确地把三相负载接入三相电源。



任务实施

2.4.1　三相电源的连接及测试



现象观察 —— 看一看

万用表交流电压挡测量两相线间的电压值及一相线与零线间的电压值，分析两相线间的

电压与一相线与零线间电压值的关系。

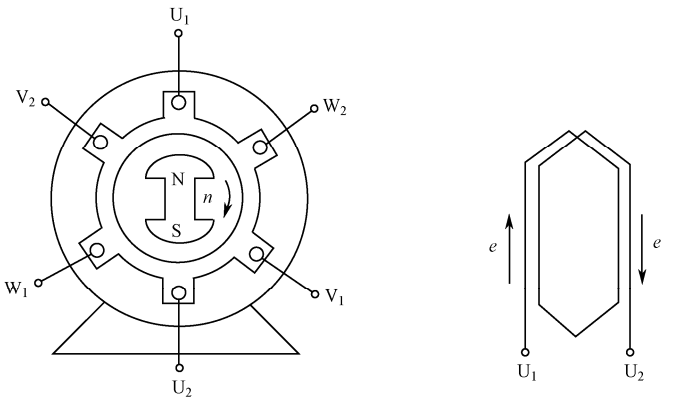


知识链接 —— 学一学

在现代电力网中，从电能的产生到输送、分配及应用，大多是采用三相交流电路。所谓三相交流电路是由幅值相等、频率相同、相位互差 120° 的三个正弦交流电源同时供电的系统。由于三相交流电在发电、输电、配电、用电等各方面都比单相交流电优越，所以在各个领域得到广泛的应用。日常生活中使用的单相电源，实际上是三相电源中的一相。

1. 三相对称电动势的产生

三相对称电动势是由三相交流发电机产生的，三相交流发电机的结构示意图如图 2-39（a）所示，它的主要组成部分是电枢和磁极。



（a）三相交流发电机的结构示意图　　（b）正弦电动势的方向

图 2-39　三相交流发电机示意图

电枢是固定的，称为定子。定子铁芯由硅钢片叠成，其内圆周表面沿径向冲有嵌线槽，用以放置三个结构相同、彼此独立的三相绕组，三相绕组的始端分别标以 U_1、V_1、W_1，末端分别标以 U_2、V_2、W_2，三相绕组在定子内圆周上彼此之间相隔 120°。

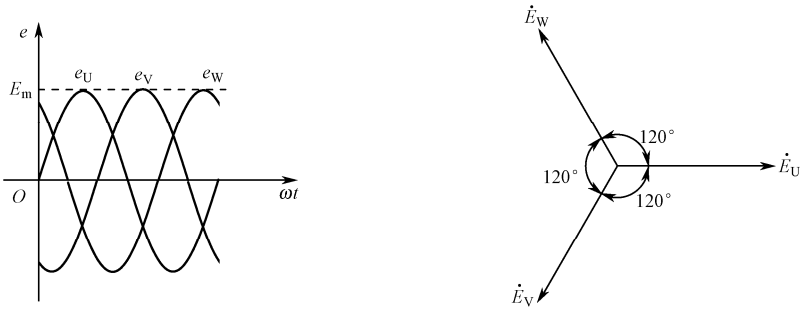
磁极是转动的，称为转子。转子铁芯上绕有励磁线圈，通入直流电流励磁，选择合适的极面形状，可使空气隙中的磁场按正弦规律分布。当转子恒速转动时，每相定子绕组依次切割磁力线，产生频率相同、幅值相等、相位互差 120° 的三相感应电动势 e_U、e_V、e_W。电动势的正方向选定为由绕组的末端指向始端。如图 2-39（b）所示，若以 e_U 为参考正弦量，则三相电动势的瞬时值表达式为：

$$\begin{cases} e_U = E_m \sin \omega t \\ e_V = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_W = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \tag{2.45}$$

三相电动势的正弦波形图和相量图如图 2-40（a）、（b）所示。

三相电动势达到最大值（或零值）的先后次序称为三相交流电的相序，由图 2-40（a）所示的波形可知，三相电动势的相序是 U→V→W→U，在工程上，通常用黄、绿、红三色来分

别表示 U 相、V 相和 W 相。按 U→V→W→U 的次序循环下去的称为顺相序，而按 U→W→V→U 的次序循环下去的称为逆相序。



（a）波形图　　（b）相量图

图 2-40　三相对称电动势的正弦波形和相量图

2. 三相电源的连接

（1）星形（Y）连接

实际发电机的三个绕组总是连接成一个整体对负载供电。如果把三相发电机绕组的三个末端连在一点，这个点称为中点，记为 N，从中点引出的导线称为中性线（简称中线）。而从绕组的三个始端引出三条输电线，称为相线或端线，俗称火线。这种连接方法称为三相电源的星形（Y）连接，如图 2-41 所示。由三根相线、一根中线构成的供电系统称为三相四线制。通常低压供电网都采用三相四线制。

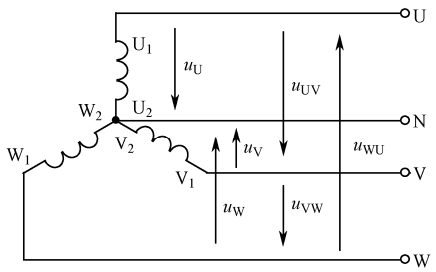


图 2-41　三相电源的星形连接

每相绕组两端的电压，即端线与中线间的电压，称为相电压，用 u_U、u_V、u_W 或一般用 u_P 表示。

任意两相绕组始端之间的电压或两根端线（火线）间的电压，称为线电压，用 u_{UV}、u_{VW}、u_{WU} 或一般用 u_L 表示。

由图 2-41 可得线电压与相电压的关系为：

$u_{UV}=u_U-u_V$，$u_{VW}=u_V-u_W$，$u_{WU}=u_W-u_U$

相量关系式为：

$$\begin{cases}\dot{U}_{UV}=\dot{U}_U-\dot{U}_V\\ \dot{U}_{VW}=\dot{U}_V-\dot{U}_W\\ \dot{U}_{WU}=\dot{U}_W-\dot{U}_U\end{cases}\qquad(2.46)$$

相量图如图 2-42 所示。绘相量图时可先绘出相电压相量，再根据式（2.46）分别绘出线电压相量。由相量图 2-42 可知，由于三相电动势对称、相电压对称，则线电压也对称，线电压在相位上超前对应的相电压 30°。

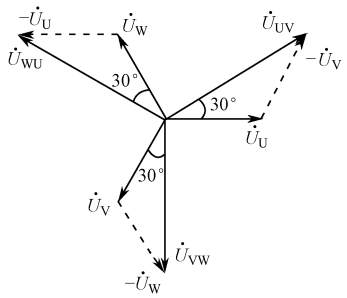


图 2-42　三相电源星形连接时线电压与相电压相量图

线电压与相电压的大小关系为：

$$U_{UV}=2U_U\cos 30^o=\sqrt{3}U_U$$

同理

$$U_{VW}=\sqrt{3}U_V,\quad U_{WU}=\sqrt{3}U_W$$

所以，在电路对称的情况下线电压和相电压存在如下关系：

$$U_U=U_V=U_W,\quad U_{UV}=U_{VW}=U_{WU}$$

$$U_L=\sqrt{3}U_P \tag{2.47}$$

u_L 导前对应的 u_p30^o。

三相电源星形连接时，线电压的大小是相电压大小的 $\sqrt{3}$ 倍，因此，三相发电机绕组星形连接时，给负载可提供两种电压，我国低压供电系统线电压为 380V，相电压为 220V，标为 380/220V。

（2）三角形（Δ）连接

如果将三相发电机三个绕组的首、末端依次连接，从三个连接点引出三根端线，这种连接方法称三相电源的三角形（Δ）连接，如图 2-43 所示。由图可知三相电源接成三角形时，线电压等于对应的相电压，关系式为：

$$U_{UV}=U_{VW},\quad U_{VW}=U_{WU},\quad U_{WU}=U_{UV}$$

即

$$U_L=U_P \tag{2.48}$$

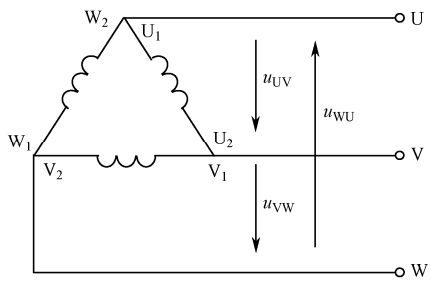


图 2-43　三相电源的三角形连接

由对称概念可知，在任何时刻，三相对称电压之和等于零，因此，当三相绕组接成闭合回路，只要连接正确，在电源内部无环流。若接错，将形成很大的环流，造成事故。在大容量的三相交流发电机中极少采用三角形连接。



实践操作 —— 做一做

请安装电源插线板及专用三相四极电源插座，并用试电笔检查接线是否正确。



问题研讨 —— 想一想

星形连接的三相电源，已知线电压 $u_{UV}=380\sqrt{2}\sin 314t$ V，你能写出其他线电压和各相电压的解析式和相量表示式吗？

2.4.2　三相负载的连接



现象观察 —— 看一看

三相电源的负载包括单相负载（如家用电器、实验仪器、电灯、小型电动工具等）和三相负载（如三相交流电动机、三相变压器等）。仔细观察家用电器、三相交流电动机等负载各用几根线？各有什么作用？

知识链接 —— 学一学

三相电路的负载由三部分组成，其中每一部分称为一相负载。若三相负载的阻抗相同（即阻抗值相等，且阻抗角相同，或表示为$|Z_U|=|Z_V|=|Z_W|$且$\varphi_U=\varphi_V=\varphi_W$），则称为三相对称负载，否则称为三相不对称负载。三相负载的连接方式有两种：星形（Y）连接和三角形（Δ）连接。

1. 三相负载的星形（Y）连接

（1）三相对称负载的星形连接

三相负载星形连接的三相四线制电路，如图 2-44 所示，每相负载的阻抗分别为 Z_U、Z_V、Z_W。如忽略导线上损失压降，则加在各相负载上的电压就等于电源对应的各相电压。

在三相交流电路中，流过各端线（火线）的电流称为线电流，分别用 i_U、i_V、i_W 表示，或用 i_L 表示；流过各相负载的电流称为相电流，用 i_P 表示；流过中线的电流称为中线电流，用 i_N 表示。习惯上选定线电流的参考正方向由电源流向负载，中线电流参考正方向由负载中性点流向电源中性点。由图 2-44 可知，负载星形连接时，由于每根端线只和一相负载连接，相电流等于对应的线电流，即

$$i_L = \text{相应的} i_P \tag{2.49}$$

一般情况下，各相电流可分成三个单相电路分别计算。

因为三相电压对称，三相负载对称，所以三相负载的相电流也对称，即

$$I_{UV} = I_{VW} = I_{WU} = I_P = \frac{U_P}{|Z|} \tag{2.50}$$

各相相电压与相电流的相位差相同，即

$$\varphi_U = \varphi_V = \varphi_W = \varphi = \arctan\frac{X}{R} \tag{2.51}$$

对称负载星形连接时电压和电流的相量图如图 2-45 所示。

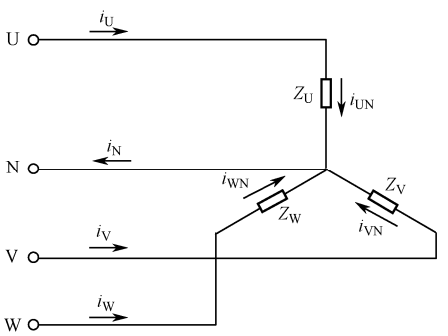


图 2-44　三相星形负载电路

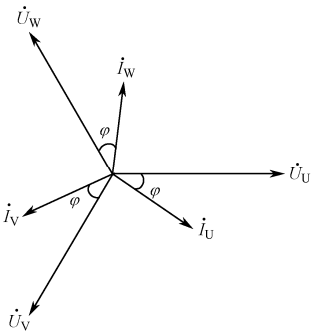


图 2-45　对称负载星形连接时电压、电流相量图

由图 2-44 得，中线电流为：

$$i_N = i_{UN} + i_{VN} + i_{WN}$$

在对称负载星形连接时，由于各相电流是对称的，所以

$$i_N = i_{UN} + i_{VN} + i_{WN} = 0 \tag{2.52}$$

即在对称的三相电路中，中线电流等于零，中线不起作用，可去掉中线，电路可采用三相三线制，如三相电动机接线电路。

在对称电路中，各相阻抗对称，各相相电压、相电流对称，三相电路可归结为一相电路的计算，计算出一相，可推知其他二相。



应用举例 —— 练一练

例 2.12　有一个星形连接的三相对称负载，每相的电阻 R=3Ω；感抗 X_L=4Ω，接在线电压为 380V 的电源上，已知 $u_{UN}=220\sqrt{2}\sin(314t+30^\circ)$V，试求各相负载的相电流的表达式。

解　因负载对称，故用“只算一相，推知其他相”的方法计算，现只算 U 相。

各相的阻抗为：$|Z|=\sqrt{R^2+X_L^2}=\sqrt{3^2+4^2}=5(\Omega)$

各相的阻抗角为：$\varphi=\arctan\dfrac{X_L}{R}=\arctan\dfrac{4}{3}=53.1^\circ$

U 相的相电流的有效值为：$I_{UN}=\dfrac{U_{UN}}{|Z|}=\dfrac{220}{5}=44\ (\text{A})$

U 相的相电流 i_U 滞后 U 相的相电压 u_{UN} 的角度为 53.1°，则 U 相的相电流 i_U 的初相为：

$$30^\circ-53.1^\circ=-23.1^\circ$$

所以，U 相的相电流表达式为：$i_U=44\sqrt{2}\sin(314t-23.1^\circ)$（A）

由于三个相电流是对称的，所以 V 相、W 相的相电流表达式分别为：

$$i_V=44\sqrt{2}\sin(314t-23.1^\circ-120^\circ)=44\sqrt{2}\sin(314t-143.1^\circ)\ （\text{A}）$$

$$i_W=44\sqrt{2}\sin(314t-23.1^\circ+120^\circ)=44\sqrt{2}\sin(314t+96.9^\circ)\ （\text{A}）$$

（2）三相不对称负载的星形连接

在三相电路中，若电源或负载有一部分不对称，此电路称为不对称电路。本节主要讨论三相电源对称、负载不对称的三相不对称电路。

在三相不对称负载采用星形连接接入三相电源时，一定要有中线，即采用三相四线制，如图 2-46 所示。电源电压对称，负载不对称（$Z_U\neq Z_V\neq Z_W$）。但由于中线的存在，所以负载的相电压仍等于电源的相电压，即仍然是对称的，各相负载均可正常工作，这时与对称负载不同之处，就是三相电流不再是对称的了。各相电流分成三个单相电路分别计算。

$$\dot{I}_U=\frac{\dot{U}_U}{Z_U},\quad \dot{I}_V=\frac{\dot{U}_V}{Z_V},\quad \dot{I}_W=\frac{\dot{U}_W}{Z_W}$$

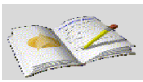
或分别计算各相电流的有效值和各相相电压与相电流之间的相位差，即

$$\begin{cases} I_U=\dfrac{U_U}{Z_U},\quad \varphi_U=\arctan\dfrac{X_U}{R_U} \\ I_V=\dfrac{U_V}{Z_V},\quad \varphi_V=\arctan\dfrac{X_V}{R_V} \\ I_W=\dfrac{U_W}{Z_W},\quad \varphi_W=\arctan\dfrac{X_W}{R_W} \end{cases}$$

线电流与相电流的关系为：$i_L=$相应的i_P。

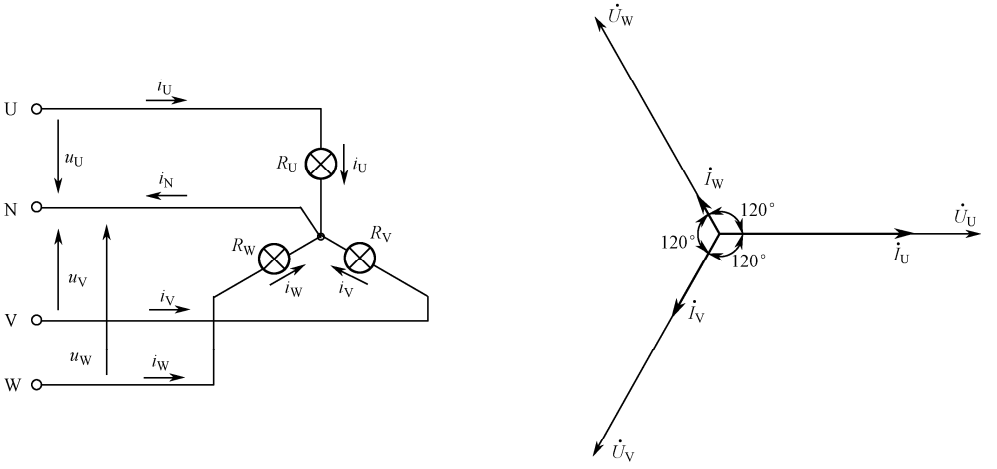
中线电流为：$\dot{I}_N=\dot{I}_U+\dot{I}_V+\dot{I}_W\neq 0$

在三相不对称负载星形连接时应注意：当三相负载不对称且无中线时，负载的相电压就不对称，分析得知，阻抗越小的相电压越低，阻抗越大的相电压越高。若低于或高于额定电压，负载将不能正常工作。中线的作用是使星形连接的不对称负载获得对称的相电压，保证负载正常工作。故三相不对称负载星形连接时，必须有中线，并且中线不能断开，中线上不装接开关、熔断器等设备，并且要用机械强度较大的钢线作为中线，以免它自行断开造成事故。



应用举例 —— 练一练

例 2.13 如图 2-46（a）所示为三相四线制供电的电路，电源线电压 U_L=380V，负载由三只白炽灯组成，每相负载的电阻值分别为：R_U=5Ω，R_V=10Ω，R_W=20Ω，每只灯的额定电压 U_N=220V。试求：（1）负载相电压、各相相电流及中线电流；（2）V 相断路而中线又断开时，各相负载的电压和电流；（3）V 相短路，而中线又断开时，各相负载的电压和电流。



（a）电路图　　（b）相电压、相电流的相量图

图 2-46　例 2.13 图

解　（1）当负载不对称而有中线的情况下，负载相电压对称等于对应的电源相电压，即

$$U_P=\frac{U_L}{\sqrt{3}}=\frac{380}{\sqrt{3}}=220\ （\text{V}）$$

设 $\dot{U}_U=220\angle 0°\text{V}$，则各相电流分别为：

$$\dot{I}_U=\frac{\dot{U}_U}{R_U}=\frac{220\angle 0°}{5}=44\angle 0°\ （\text{A}）$$

$$\dot{I}_V=\frac{\dot{U}_V}{R_V}=\frac{220\angle(-120°)}{10}=22\angle(-120°)\ （\text{A}）$$

$$\dot{I}_W=\frac{\dot{U}_W}{R_W}=\frac{220\angle 120°}{20}=11\angle 120°\ （\text{A}）$$

各相电流的有效值分别为：I_U=44A，I_V=22A，I_W=11（A）。

绘相量图如图 2-46（b）所示。

中线电流为：

$$\dot{I}_N = \dot{I}_U + \dot{I}_V + \dot{I}_W = 44\angle 0^\circ + 22\angle(-120^\circ) + 11\angle 120^\circ = 29.1\angle(-19^\circ)\ （A）$$

由于负载不对称程度较高，中线电流较大。所以在实际工作中，尽量做到均匀分配三相负载，以减小中线电流。

（2）V 相断路而中线又断开时，各相负载的电压和电流

这种情况下，电路已成为单相电路，U 相与 W 相串联，接在线电压 U_{UW}=380V 的电源上，如图 2-47（a）所示。U 相和 W 相负载电流、电压分别为：

$$I_{UW} = \frac{U_{UW}}{R_U + R_W} = \frac{380}{5+20} = 15.2\ （A）$$

$$U_U = I_{UW} R_U = 15.2 \times 5 = 76\ （V）$$

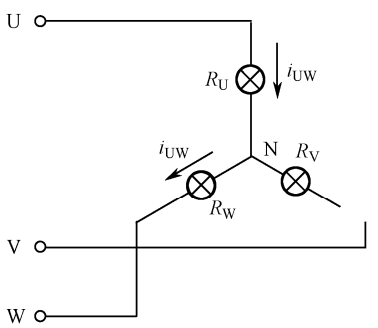
$$U_W = I_{UW} R_W = 15.2 \times 20 = 304\ （V）$$

U 相电灯组的电压远低于额定电压，W 相电灯组的电压远高于额定电压（烧坏），这些情况是不允许的。

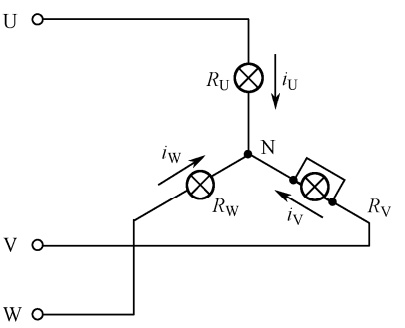
（3）V 相短路，而中线又断开时，各相负载的电压和电流

此时负载的中点 N 即为 V 端线，如图 2-47（b）所示。U 相、W 相负载接在两火线间，负载相电压为线电压，即

$$U_V=0，U_U=U_{UV}=380V，U_W=U_{WV}=380V$$



（a）V相断路，中线断开



（b）V相短路，中线断开

图 2-47　例 2.13（2）、（3）的图

负载相电流分别为：

$$I_U = \frac{U_U}{R_U} = \frac{380}{5} = 76\ （A）$$

$$I_W = \frac{U_W}{R_W} = \frac{380}{20} = 19\ （A）$$

U 相、W 相都越过额定电压，是不允许的。

由上例分析可知：当三相负载不对称且无中线时，负载的相电压就不对称，阻抗越小的

相电压越低；阻抗越大的相电压越高，低于或高于额定电压，负载不能正常工作。所以三相不对称负载星形连接时必须要有中线。

2. 三相负载的三角形（△）连接

如果三个单相负载 Z_U、Z_V、Z_W 的额定电压等于电源线电压，则必须把负载分别接在电源的各端线之间，这就构成了负载三角形（△）连接电路，如图 2-48 所示。

（1）三相对称负载的三角形连接

三相负载的三角形连接电路如图 2-48 所示，因为各相负载接在两根端线之间，所以各相负载的相电压就等于对应的电源线电压，即 u_P=相应的 u_L，在数值上 $U_P=U_L$。

由图 2-48 可得，$i_U=i_{UV}-i_{WU}$，$i_V=i_{VW}-i_{UV}$，$i_W=i_{WU}-i_{VW}$，由于三相负载是对称的，所负载的相电流是对称的，线电流也是对称的，绘出相量图如图 2-49 所示。

由相量图 2-49 可见，由于三相相电压对称、相电流对称，则线电流也对称，线电流在相位上落后对应的相电流 30°，并且相电流的有效值 I_P 和线电流有效值 I_L 的关系为：

$$I_L=\sqrt{3}I_P \tag{2.53}$$

三相对称负载三角形连接时，相电压对称，因每相负载都接在两条端线之间，若一相负载断开，并不影响其他两相工作。

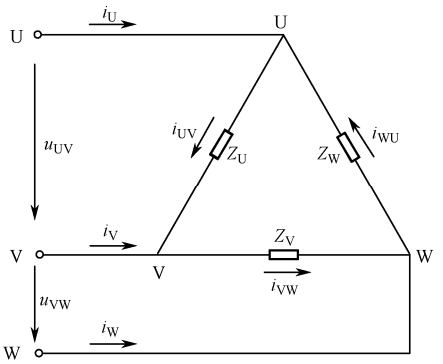


图 2-48　三相对称负载三角形连接

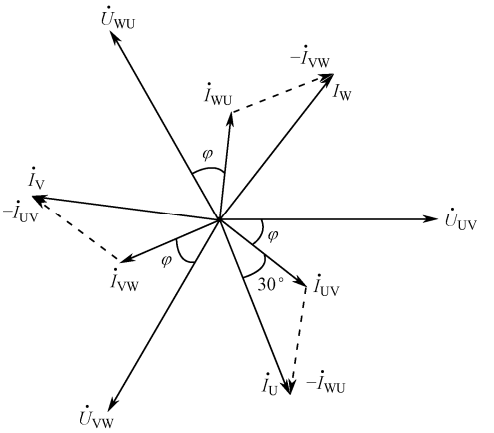


图 2-49　三相对称负载△形连接时电压、电流相量图

（2）三相不对称负载的三角形连接

在三相电路中，电源电压对称，负载不对称，各相相电流可分成三个单相电路分别计算，线电流要根据基尔霍夫电流定律进行相量计算。

三相负载不对称三角形连接时，相电流不对称，线电流也不对称。



应用举例 —— 练一练

例 2.14　有一台三相交流电动机，每相绕组的等效电阻 R=6Ω，感抗 X_L=8Ω，连成三角形，接在线电压 U_L=380V 的三相电源上，试求电动机的相电流和线电流。

解　因为三相负载是对称的，所以各相的相电流相等，线电流也相等，并且 $I_L=I_P$。

负载相电压为：$U_P=U_L=380V$

每相阻抗为：$|Z|=\sqrt{R^2+X_L^2}=\sqrt{6^2+8^2}=10(\Omega)$

相电流有效值为：$I_P=\dfrac{U_P}{|Z|}=\dfrac{380}{10}=38$（A）

线电流有效值为：$I_L=\sqrt{3}I_P=65.7$（A）

例 2.15　在如图 2-50 所示的电路中。已知电源电压对称，U_L=220V，由三个灯泡组成三角形负载，V、W 相之间并联一个带开关 S 的灯泡。灯泡的额定值为：P_N=100W，U_N=220V。试求：（1）开关 S 断开时，相电流和线电流各为何值？画出相量图；（2）开关 S 闭合后，相电流和线电流各为何值？

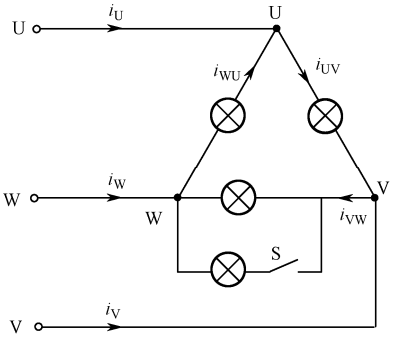


图 2-50　例 2.15 图

解　（1）开关 S 断开时，为对称负载作三角形连接，各相电流值相等，各线电流值也相等。

$$I_P=\frac{P_N}{U_N}=\frac{100}{220}=0.455(\text{A})$$

$$I_L=\sqrt{3}I_P=0.788(\text{A})$$

设$\dot{U}_{UV}=220\angle 0°\text{V}$，因为各相为纯电阻性负载，各相电流是对称的，所以各相电流的相量分别为：

$$\dot{I}_{UV}=0.455\angle 0°(\text{A})$$

$$\dot{I}_{vw}=0.455\angle(-120°)(\text{A})$$

$$\dot{I}_{wu}=0.455\angle 120°(\text{A})$$

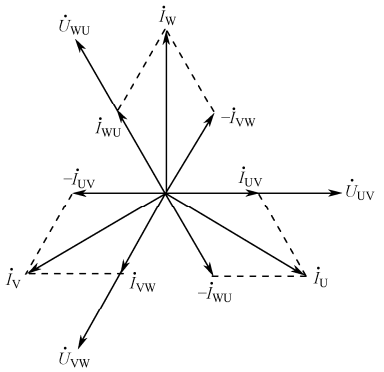
各线电流也是对称的，各线电流相量分别为：

$$\dot{I}_U=\sqrt{3}\dot{I}_{UV}\angle(-30°)=0.788\angle(-30°)(\text{A})$$

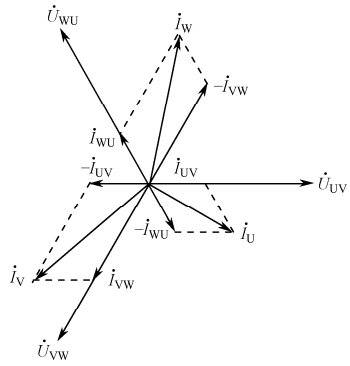
$$\dot{I}_V=0.788\angle(-150°)(\text{A})$$

$$\dot{I}_W=0.788\angle 90°(\text{A})$$

对称负载三角形连接时的相量图如图 2-51（a）所示。



（a）负载对称时的相量图



（b）负载不对称时的相量图

图 2-51　例 2.15 的相量图

（2）开关闭合时，为不对称负载作三角形连接，各相负载相电流相量分别为：

$$\dot{I}_{UV}=0.455\angle 0^{\circ}(\mathrm{A})，\ \dot{I}_{VW}=0.91\angle(-120^{\circ})(\mathrm{A})，\ \dot{I}_{WU}=0.455\angle 120^{\circ}(\mathrm{A})$$

各端线的线电流相量分别为：

$$\dot{I}_{U}=\dot{I}_{UV}-\dot{I}_{WU}=0.455\angle 0^{o}-0.455\angle 120^{o}=0.788\angle(-30^{o})(\mathrm{A})$$

$$\dot{I}_{V}=\dot{I}_{VW}-\dot{I}_{UV}=0.91\angle(-120^{o})-0.455\angle 0^{o}=1.2\angle(-139.1^{o})(\mathrm{A})$$

$$\dot{I}_{W}=\dot{I}_{WU}-\dot{I}_{VW}=0.455\angle 120^{o}-0.91\angle(-120^{o})=1.2\angle 79.1^{o}(\mathrm{A})$$

不对称负载三角形连接时的电流相量图如图 2-51（b）所示。

3. 三相电路的功率

无论是星形连接还是三角形连接，也无论是对称负载还是不对称负载，三相电路的有功功率都等于各相有功功率之和，即

$$P=P_{U}+P_{V}+P_{W}=U_{U}I_{U}\cos\varphi_{U}+U_{V}I_{V}\cos\varphi_{V}+U_{W}I_{W}\cos\varphi_{W} \tag{2.54}$$

式中，各电压、电流为各相的相电压、相电流；φ 是各相相电压与相电流的相位差。

对于对称三相负载，各相电压和电流有效值相等、相位差相同、各相有功功率也相等，则

$$P=3P_{P}=3U_{P}I_{P}\cos\varphi \tag{2.55}$$

在三相电路中，线电压和线电流的测量比较方便，所以功率公式常用线电压、线电流表示。

当对称负载为 Y 连接时：$U_{L}=\sqrt{3}U_{P}$、$I_{L}=I_{P}$，当对称负载为 Δ 连接时：$U_{L}=U_{P}$、$I_{L}=\sqrt{3}I_{P}$，所以三相对称负载无论是 Y 连接或Δ连接，其有功功率表达式为：

$$P=\sqrt{3}U_{L}I_{L}\cos\varphi \tag{2.56}$$

使用式（2.56）时，应当注意：φ 角取决于负载阻抗的阻抗角，仍是某相相电压与该相相电流的相位差，并不是线电压与线电流的相位差。

同理，三相电路的无功功率也等于各相无功功率之和，即

$$Q=Q_{U}+Q_{V}+Q_{W}=U_{U}I_{U}\sin\varphi_{U}+U_{V}I_{V}\sin\varphi_{V}+U_{W}I_{W}\sin\varphi_{W} \tag{2.57}$$

对于三相对称负载，三相电路的无功功率表达式为：

$$Q=3Q_{P}=3U_{P}I_{P}\sin\varphi=\sqrt{3}U_{L}I_{L}\sin\varphi \tag{2.58}$$

三相电路的视在功率为：

$$S=\sqrt{P^{2}+Q^{2}} \tag{2.59}$$

在对称三相负载电路中，视在功率为：

$$S=3U_{P}I_{P}=\sqrt{3}U_{L}I_{L} \tag{2.60}$$



应用举例 —— 练一练

例 2.16　三相对称负载，每相负载的电阻 R=6Ω，感抗 X_{L}=8Ω，接入 380V 的三相三线制电源。试比较星形和三角形两种连接时消耗的三相电功率。

解　各相负载的阻抗为：$|Z|=\sqrt{R^{2}+X_{L}^{2}}=\sqrt{6^{2}+8^{2}}=10(\Omega)$

负载的功率因数为：$\cos\varphi=\dfrac{R}{|Z|}=\dfrac{6}{10}=0.6$

星形连接时，负载的相电压为：$U_{\mathrm{p}}=\dfrac{U_{\mathrm{L}}}{\sqrt{3}}=\dfrac{380}{\sqrt{3}}=220(\mathrm{V})$

线电流等于相电流：$I_{\mathrm{L}}=I_{\mathrm{p}}=\dfrac{U_{\mathrm{P}}}{|Z|}=\dfrac{220}{10}=22(\mathrm{A})$

故星形连接时，三相总有功功率为：

$$P_{\mathrm{Y}}=\sqrt{3}U_{\mathrm{L}}I_{\mathrm{L}}\cos\varphi=\sqrt{3}\times380\times22\times0.6\approx8.7(\mathrm{kW})$$

三角形连接时，负载的相电压等于电源的线电压为：$U_{\mathrm{p}}=U_{\mathrm{L}}=380\,(\mathrm{V})$

负载的相电流为：$I_{\mathrm{p}}=\dfrac{U_{\mathrm{P}}}{|Z|}=\dfrac{380}{10}=38(\mathrm{A})$

线电流为：$I_{\mathrm{L}}=\sqrt{3}I_{\mathrm{p}}=\sqrt{3}\times38\approx66(\mathrm{A})$

故三角形连接时，三相总有功功率为

$$P_{\Delta}=\sqrt{3}U_{\mathrm{L}}I_{\mathrm{L}}\cos\varphi=\sqrt{3}\times380\times66\times0.6\approx26.1(\mathrm{kW})$$

可见，$P_{\triangle}\neq P_{\mathrm{Y}}$；且 $P_{\triangle}=3P_{\mathrm{Y}}$

上述结果表明，在三相电源线电压一定的条件下，对称负载三角形接法消耗的功率是星形接线的 3 倍。这是因为，三角形连接时负载相电压是星形连接时的 $\sqrt{3}$ 倍，因而相电流也增为 $\sqrt{3}$ 倍；且三角形连接时线电流又是相电流的 $\sqrt{3}$ 倍，所以，三角形连接时的线电流是星形连接的 3 倍。因此，$P_{\triangle}$ 就是 P_{Y} 的 3 倍了。无功功率和视在功率也都是如此。

负载消耗的功率与连接方式有关，要使负载正常运行，必须采用正确的接法，例如，在同一电源条件下负载应接成星形的就不能接成三角形，否则负载会因 3 倍的过载而烧毁；反之，在同一电源条件下负载应接成三角形的也不能接成星形，否则负载也不能正常工作。



实践操作 —— 做一做

1. 三相负载星形连接电路的测试

（1）按图 2-52 所示电路连接线路，将电流表接在各相线及中线上。电源线电压 U_{L}=380V。经教师检查后，接通电源进行实验。

（2）将开关 S_1 断开、S_2 闭合，形成三相四线制对称负载。然后合上电源开关 QS 测量各线电压、相电压、线电流、中点间电压、中线电流，将测试数据填入表 2-10 中。

（3）断开 QS、S_2 形成三相三线制对称负载。再合上 QS 重复测量上述各量，将数据填入表 2-10 中，并与有中线时的测量结果相比较，比较相应各量有无变化。

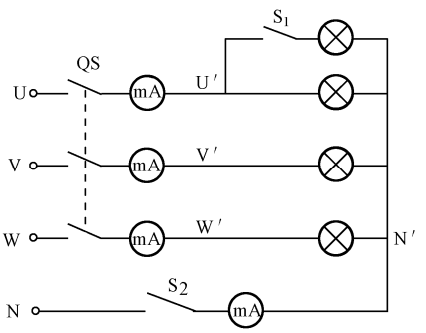


图 2-52　三相负载作星形连接的实验电路

（4）断开 QS，闭合 S_1、S_2，形成三相四线制不对称负载。合上 QS 再测量各量，将测试数据填入表 2-10 中。

（5）断开 QS、S_2 形成三相三线制不对称负载，再合上 QS 重复测量上述各量，将测试数据填入表 2-10 中，并与有中线时的测量结果相比较，比较相应各量有无变化。

表 2-10　三相负载星形连接时测量数据表

测量项目 / 负载情况		线电压（V）			负载相电压（V）			线电流（mA）			中点间电压（V）	中线电流（mA）
		U_{UV}	U_{VW}	U_{WU}	$U_{U'N'}$	$U_{V'N'}$	$U_{W'N'}$	I_U	I_V	I_W	$U_{NN'}$	I_N
负载对称	有中线											
	无中线											
负载不对称	有中线											
	无中线											

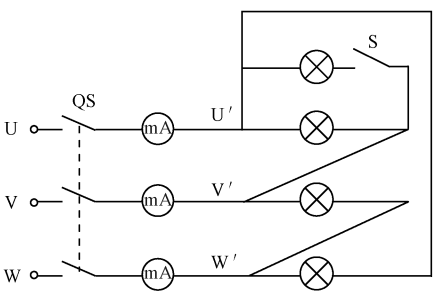


图 2-53　三相负载三角形连接的实验电路

2. 三相负载三角形连接

（1）将三相电源的线电压调至 220V。

（2）按图 2-53 接线，在相应位置接入电流表。请教师检查后，接通电源继续实验操作。

（3）断开 S 形成对称负载。合上 QS 测量相电压、线电流、相电流各量，将测试数据填入表 2-11 中。

（4）闭合 S，形成不对称负载，合上 QS 再测量上述各量，观察相应各量有无变化，将测试数据填入表 2-11 中。

表 2-11　三相负载三角形连接时测量数据表

测量项目 / 负载情况	负载相电压（V）			线电流（mA）			相电流（mA）		
	$U_{U'V'}$	$U_{V'W'}$	$U_{W'U'}$	I_U	I_V	I_W	$I_{U'V}$	$I_{V'W}$	$I_{W'U}$
负载对称									
负载不对称									

操作时应注意：

① 由于三相电源电压较高，实验中线路必须经教师检查同意后方可通电实验。

② 接线要仔细、牢靠，使用多股线时要防止裸线带毛刺，导线连接处要用绝缘胶带包好，以确保绝缘。

③ 测量电流和电压时，一定要注意仪表在线路中的正确连线和量程的选择。特别是用万用表测量时，操作一定要细心、谨慎，防止烧坏仪表或发生触电事故等。

④ 由于三相三线制不对称负载星形连接时各相所承受的相电压不等，在实验中，有些灯

泡承受的电压已超过其额定值。因此测量、读数要迅速，读数完毕马上断电，以免损坏设备。

⑤ 更换实验内容时，必须先切断电源，严禁带电操作。



问题研讨 —— 想一想

（1）三相负载在什么情况下应接成星形连接？在什么情况下应接成三角形连接？在什么情况下应接成有中线的星形连接？

（2）三相四线制接法的照明电路中，忽然有两相电灯变暗，一相变亮，试判断是何故障？

（3）三相对称负载为三线制星形连接时，有一相断开或短路，对其他两相各有何影响？

（4）三相总的视在功率为什么不等于各相视在功率之和？

（5）你能否根据实验中观察到的现象，说明在三相四线制供电线路中，中线上一定不能安装熔断器的道理？

任务 2.5　安全用电与节约用电常识



任务描述

电能是一种优越的能源，在工业、农业、交通、国防、科学技术以及社会生活等各个领域获得了广泛的应用，但是，电本身是看不见、摸不着的，它在造福人类的同时，对人类也造成很大的潜在危险。如果缺乏安全用电知识，没有恰当的措施和正确的技术，就不能做到安全用电，就会给人们的生命财产造成不可估量的损失。因此，宣传安全用电知识和普及安全用电技能是人们安全合理地使用电能，避免用电事故发生的一大关键。另外随着国家电力工业的飞速发展，工农业生产和人民群众的日常生活对用电的需求量也越来越大，但电力供应的缺口仍然很大，作为一名电气工作的从业人员，养成节约用电的习惯，推广节约用电的经验和方法，是义不容辞的责任。本任务学习安全用电和节约用电常识。



任务目标

了解人体触电的原因及预防措施，遵守安全用电操作规程，养成节约用电的良好习惯。



知识链接 —— 学一学

2.5.1　安全用电常识

1. 触电

（1）触电的种类

在日常生活和工作中，人体因触及带电体，受到电压作用造成局部受伤，甚至死亡的现

象，称为触电。人体触电时，电流通过人体，就会产生伤害。电流对人体的伤害，按其性质可分为电击和电伤两种。

电击：是指电流使人体内部器官受到损害。触电时肌肉发生收缩，如果触电者不能迅速摆脱带电部分，电流将持续通过人体，最后因神经系统受到损害，使心脏和呼吸器官停止工作而趋于死亡。所以电击危险性最大，而且也是经常遇到的一种伤害。

电伤：是指因电弧或熔丝熔断时飞溅的金属微粒等对人体的外部伤害，如烧伤、金属微粒溅伤等。电伤的危险虽不像电击那样严重，但也不容忽视。

人体触电伤害程度与通过人体电流的大小、电流通过人体时间的长短、电流通过人体的部位、通过人体电流的频率、触电者的身体状况等有关。

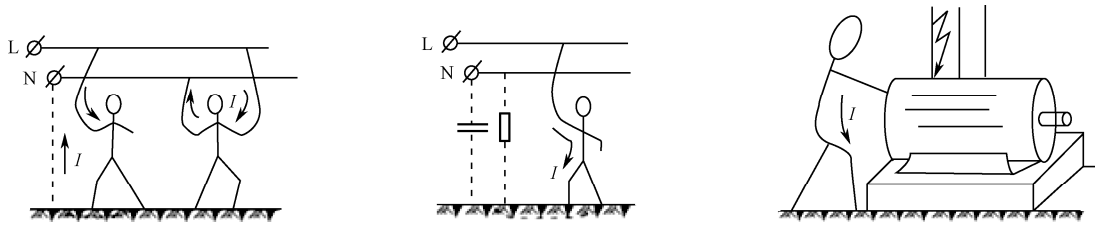
一般来说，通过人体的电流越大，时间越长，危险也就越大；触电时间超过人体的心脏搏动周期（约 750ms），或触电正好开始于搏动周期的易损伤期时，危险最大；电流通过人体脑部或心脏时最为危险；40~60Hz 的交流电对人体的危害最大，直流电流与较高频率电流的危险性则小些。

以工频电流为例，实验资料表明（不建议自行验证）：当 1mA 左右的电流通过人体时，会产生麻刺等不舒服的感觉；10～30mA 的电流通过人体，会产生麻痹、剧痛、痉挛、血压升高、呼吸困难等症状，但通常不致有生命危险；电流达到 50mA 以上，就会引起心室颤动而有生命危险；100mA 以上的电流，足以致人于死地。

通过人体电流的大小与触电电压和人体电阻有关，而且还与环境条件等因素以及接触电压有很大关系。通常人体的电阻约在 800~$10^4\Omega$ 范围内变化，人体电阻越大，受电流伤害越轻。细嫩潮湿的皮肤，电阻可降到 800Ω 以下。接触的电压升高时，人体电阻会大幅度下降。

（2）人体触电的方式

单相触电：在低压电力系统中，若人站在地上接触到一根相线，即为单相触电或称单线触电，如图 2-54 所示，这是常见的触电方式。如果系统中性点接地，则加于人体的电压为 220V，流过人体的电流足以危及生命，如图 2-54（a）所示。中性点不接地时，虽然线路对地绝缘电阻可起到限制人体电流的作用，但线路对地存在分布电容、分布电阻，作用于人体的电压为线电压 380V，触电电流仍可达到危害生命的程度，如图 2-54（b）所示。人体接触漏电的设备外壳，也属于单相触电，如图 2-54（c）所示。



（a）中性点接地系统的单相触电　　（b）中性点不接地系统的单相触电　　（c）接触漏电设备外壳的单相触电

图 2-54　单相触电

两相触电：人体不同部位同时接触两相电源带电体而引起的触电叫两相触电，如图 2-55 所示。无论电网中性点是否接地，人体所承受的线电压均比单相触电时要高，危险性更大。

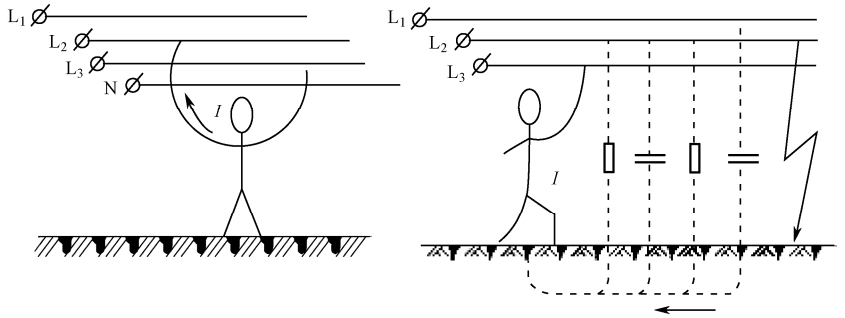


图 2-55　两相触电

接触电压、跨步电压触电：这也是危险性较大的一种触电方式。当外壳接地的电气设备绝缘损坏而使外壳带电，或导线断落发生单相接地故障时，电流由设备外壳经接地线、接地体（或由断落导线经接地点）流入大地，向四周扩散，在导线接地点及周围形成强电场。其电位分布以接地点为圆心向周围扩散，一般距接地体 20m 远处的电位为零。这时，人站在地上触及设备外壳，就会承受一定的电压，称为接触电压。如果人站在设备附近地面上，两脚之间也会承受一定的电压，称为跨步电压，如图 2-56 所示。接触电压和跨步电压的大小与接地电流、土壤电阻率、设备接地电阻及人体的位置有关。当接地电流较大时，接触电压和跨步电压会超过允许值发生人身触电事故，特别是在发生高压接地故障或雷击时，会产生很高的接触电压和跨步电压。一般离接地体 20m 以外，就不会发生跨步电压触电。

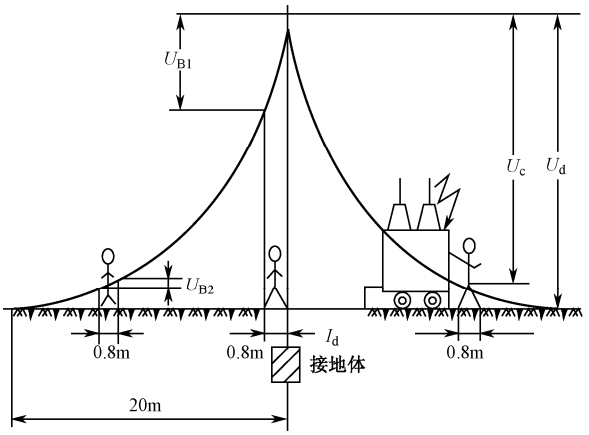


图 2-56　跨步电压的大小

（3）触电的原因

触电分为直接触电和间接触电两种情况。直接触电是指人体直接接触或过分接近带电体而触电；间接触电是指人体触及正常时不带电而发生故障时才带电的金属导体。

触电的场合不同，引起触电的原因也不同。常见的触电原因主要有以下几种情况。

线路架设不合规格：线路架设不合规格主要表现为室内外线路对地距离、导线之间的距离小于容许值；通信线、广播线与电力线间隔距离过近或同杆敷设；线路绝缘破损；有的地区为节省电线而采用一线一地制送电等。

电气操作制度不严格：电气操作制度不严格主要表现在：带电操作，不采取可靠的保安措施；不熟悉电路和电器，盲目修理；救护已触电的人，自身不采用安全保护措施；停电检修，不挂电气安全警示牌；使用不合格的保安工具检修电路和电器；人体与带电体过分接近，

又无绝缘措施或屏护措施；在架空线上操作，不在相线上加临时接地线；无可靠的防高空跌落措施等。

用电设备不合要求：用电设备不合要求表现在：电气设备内部绝缘差或损坏，金属外壳无保护接地措施或接地电阻太大；开关、闸刀、灯具、携带式电器绝缘外壳破损，失去防护作用；开关、熔断器误装在中性线上，一旦断开，就使整个线路带电。

用电不规范：用电不规范表现为违反布线规程，在室内乱拉电线；随意加大熔断器的熔丝规格；在电线上或电线附近晾晒衣物；在电杆上拴牲口；在电线（特别是高压线）附近打鸟、放风筝；在未切断电源时，移动家用电器；打扫卫生时用水冲洗或用湿布擦拭带电电器或线路等。

2. 安全用电的措施

（1）使用安全电压

电流通过人体时，人体承受的电压越低，触电伤害就越轻。当电压低于某一定值后，就不会造成触电了。这种不带任何防护设备，对人体各部分组织均不造成伤害的电压值，称为安全电压。

世界各国对于安全电压的规定：有 50 伏、40 伏、36 伏、25 伏、24 伏等，其中以 50 伏、25 伏居多。国际电工委员会（IEC）规定安全电压限定值为 50 伏，

我国规定 12 伏、24 伏、36 伏三个电压等级为安全电压级别。在湿度大、狭窄、行动不便、周围有大面积接地导体的场所（如金属容器内、矿井内、隧道内等）使用的手提照明，应采用 12 伏的安全电压。凡手提照明器具，在危险环境、特别危险环境的局部照明灯，高度不足 2.5 米的一般照明灯、携带式电动工具等，若无特殊的安全防护装置或安全措施，均应采用 24 伏或 36 伏安全电压。

安全电压的规定是从总体上考虑的，对于某些特殊情况，某些人也不一定绝对安全，所以即使在规定的安全电压下工作，也不可粗心大意。

（2）直接触电预防

绝缘措施：良好的绝缘是保证电气设备和线路正常运行的必要条件，是防止触电事故的重要措施。选用绝缘材料必须与电气设备的工作电压、工作环境和运行条件相适应。不同的设备或电路对绝缘电阻的要求不同。例如，新装或大修后的低压设备和线路，绝缘电阻不应低于 0.5MΩ；运行中的线路和设备，绝缘电阻要求每伏工作电压 1kΩ 以上；高压线路和设备的绝缘电阻不低于每伏 1000MΩ。

屏护措施：采用屏护装置，如常用电器的绝缘外壳、金属网罩、金属外壳、变压器的遮栏、栅栏等将带电体与外界隔绝开来，以杜绝不安全因素。凡是金属材料制作的屏护装置，应妥善接地或接零。

间距措施：为防止人体触及或过分接近带电体，在带电体与地面间、带电体与其他设备间，应保持一定的安全间距。间距大小取决于电压的高低、设备类型、安装方式等因素。

（3）间接触电预防

加强绝缘：对电气设备或线路采取双重绝缘，可使设备或线路绝缘牢固，不易损坏。即使工作绝缘损坏，还有一层加强绝缘，不致发生金属导体裸露造成间接触电。

电气隔离：采用隔离变压器或具有同等隔离作用的发电机，使电气线路和设备的带电部分处于隔离状态。即使线路或设备的工作绝缘损坏，人站在地面上与之接触也不易触电。

必须注意：被隔离回路的电压不得超过 500V，其带电部分不能与其他电气回路或大地相连。

自动断电保护：在带电线路或设备上采取漏电保护、过流保护、过压或欠压保护、短路保护、接零保护等自动断电措施，当发生触电事故时，在规定时间内能自动切断电源，起到保护作用。

（4）使用安全标志

安全标志由安全色、几何图形和图形符号构成，用以表达特定的安全信息。安全标志可提醒人们注意或按标志上注明的要求去执行，是保障人身和设施安全的重要措施，一般设置在光线充足、醒目、稍高于视线的地方。

安全色是表达安全信息含义的颜色，表示禁止、警告、指令、提示等。为了使人们能迅速发现或分辨安全标志和提醒人们注意，国家标准《安全色》（GB2893—82）中已规定传递安全信息的颜色。安全色规定为红、蓝、黄、绿四种颜色，其含义及用途为：红色表示禁止、停止或防火；蓝色表示指令必须遵守的规定；黄色表示警告；绿色，提示、安全状态、通行。

为使安全色更加醒目的反衬色叫对比色。国家规定的对比色是黑、白两种颜色。安全色与其对应的对比色是：红—白，黄—黑，蓝—白，绿—白。

黑色用于安全标志的文字、图形符号和警告标志的几何图形。白色作为安全标志红、蓝、绿色的背景色，也可以用于安全标志的文字和图形符号。

《电力工业技术管理法规》（GB2681—81）中规定：电器母线和引下线应涂漆，并要按相分色。其中第 1 相（L1）为黄色；第 2 相（L2）为绿色；第 3 相（L3）为红色。涂漆的目的是区别相序，防腐蚀和便于散热。

该标准还规定：交流回路中零线和中性线用淡蓝色，接地线用黄—绿双色线；双芯导线或绞合线用红、黑色线并行；直流回路中正极用棕色，负极用蓝色，接地中线用淡蓝色。

国家标准《手持式电动工具的管理、使用、检查和维修安全技术规程》（GB3787—93）中特别强调在手持式电动工具的电源线中，黄—绿双色线在任何情况下只能用于保护接地线或零线。

（5）采用保护接地和保护接零措施

电气设备内部的绝缘材料因老化或其他原因损坏出现带电部件与设备外壳形成接触，使外壳带电，极易造成人员触及设备外壳而发生触电事故。为防止事故发生，通常采用的技术防护措施有电气设备的低压保护接地和低压保护接零，以及在设备供电线路上安装低压漏电保护开关。

保护接地：这是将电气设备在正常情况下不带电的金属部分与大地进行金属性连接，以保证人身的安全。在中性点不接地的系统中，设备外壳不接地而意外带电时，外壳与大地间存在电压，人体触及外壳时，电流就会经过人体和线路对地电容形成回路，发生触电，如图 2-57（a）所示。为了避免这种触电危险，应尽量降低人体所能触到的接触电压，应将电气设备的金属外壳与接地体相连接，即保护接地，如图 2-57（b）所示，此时碰壳的接地电流则沿着接地体和人体两条通路流过，流过每一通路的电流值将与其电阻的大小成反比，其接地电阻 R_d 通常小于 4Ω，人体电阻 R_r 在恶劣的环境下为 1000Ω 左右，因此，流过人体的电流很小，

完全可以避免或减轻触电危害。

保护接地适用于中性点不接地的低压电力系统中，如发电厂和变电所中的电气设备实行保护接地，并尽可能使用同一接地体。每一年都要测试接地电阻，确保阻值在规定的范围内。

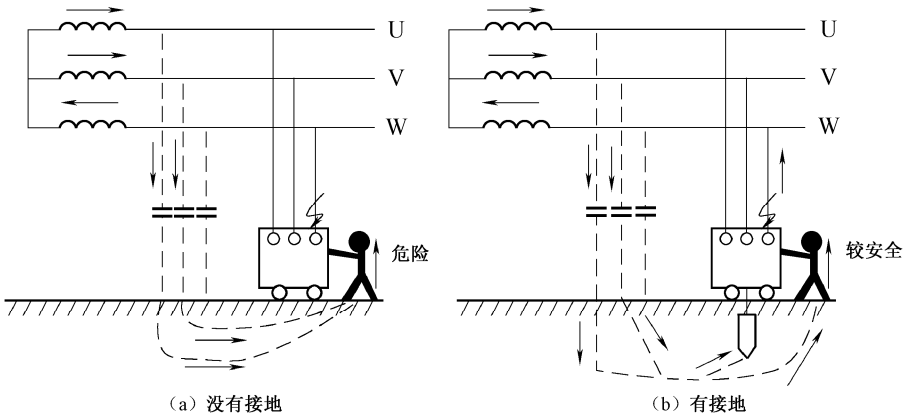


图 2-57　保护接地

保护接零：在中性点接地的电力系统中，将电气设备正常不带电的金属外壳与系统的零线相连接，这就是人们常所说的保护接零，如图 2-58 所示。当电气设备的某一相因绝缘损坏而发生碰壳短路时，短路电流经外壳和零线构成闭合回路，由于相线和零线合成电阻很小，所以短路电流很大，立即将熔断器的熔丝熔断或使其他保护装置动作，迅速切断电源，防止触电。

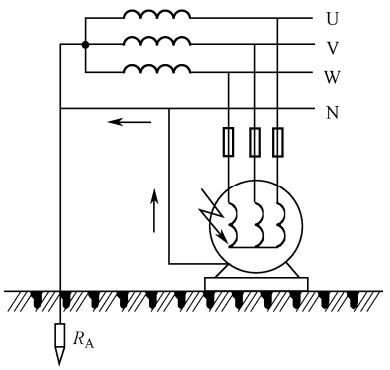


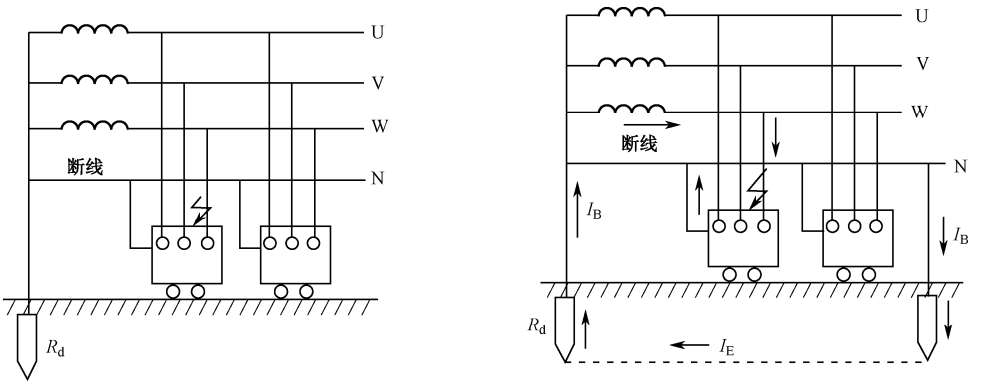
图 2-58　保护接零

为使保护接零更加可靠，零线上禁止安装熔断器和单独的开关，以防零线断开，失去保护接零的作用。

保护接零主要用于380V/220V及三相四线制电源中性点直接接地的配电系统中。

在图 2-59（a）中未采用重复接地，如果零线断开时，当电气设备发生单相碰壳时，由于设备外壳既未接地，也未接零，其碰壳故障电流较小，不能使熔断器等保护装置动作而及时切除故障点，使设备外壳长期带电，人体一旦触及就会发生触电危险。故必须采用重复接地，即在三相四线制电力系统中，除将变压器的中性点接地外还必须在中性线上不同处再行接地，即重复接地。重复接地电阻应小于 10Ω，如图 2-59（b）所示。可见，重复接地可使漏电设备外壳的对地电压降低，也使万一中性线断线时的触电危险减少。

应当注意：在同一个配电系统中，不能同时有一部分设备采用保护接地，而另一部分设备采用保护接零，否则当采用保护接地的设备发生单相接地故障时，采用保护接零的设备外露可导电部分将带上危险的电压，这是十分危险的。保护接零只适用于中性点接地的三相四线制电力系统，保护接地只适用于中性点不接地的电力系统。



（a）没有重复接地　　（b）有重复接地

图 2-59　重复接地

3. 防雷电

雷电是一种自然现象，它产生的强电流、高电压、高温、高热具有很大的破坏力和多方面的破坏作用。比如对建筑物或电力调度的破坏、对人畜的伤害、引起大规模停电、造成火灾或爆炸等。雷击的危害是严重的，必须采取有效的防护措施。

（1）常用防雷装置

避雷针和避雷线：避雷针及避雷线是防止直接雷击的有效装置，它们的作用是将雷电吸引到金属针（线）上并安全泄入大地而保护附近的建筑物、线路和设备。为保证安全用电，在室外的变电设备、构架、建筑物等应安装独立的避雷针，这些独立避雷针除有单独的接地设备装置外，还应与被保护物之间保持一定的空间距离。

避雷器：防止雷电的感应电压入侵电气设备和线路的主要方法是采用避雷器。所有电气设备的绝缘都具有一定的耐压能力，一般均不低于工频线电压的 3.5～7 倍。如果施加的过电压超过这个范围，将发生闪路爬弧或击穿绝缘，使电气设备损坏。如果在电气设备上并联一种保护设备，且令保护设备的放电电压低于电气设备绝缘的耐压值，当过电压侵袭时，首先使保护设备立即对地放电，从而使被保护设备的绝缘免受过电压的破坏，当过电压消失后，保护设备又能自动恢复到起始状态，这种设备即为通常所说的避雷器。

（2）防雷电常识

① 为防止感应雷和雷电侵入波沿架空线进入室内，应将进户线最后一根支承物上的绝缘子铁脚可靠接地。

② 雷雨时，应关好室内门窗，以防球形雷飘入；不要站在窗前或阳台上、有烟囱的灶前；应离开电力线、电话线、无线电天线 1.5 米以外。

③ 雷雨时，不要洗澡、洗头，不要待在厨房、浴室等潮湿的场所。

④ 雷雨时，不要使用家用电器，应将电器的电源插头拔下。

⑤ 雷雨时，不要停留在山顶、湖泊、河边、沼泽地、游泳池等易受雷击的地方；最好不用带金属柄的雨伞。

⑥ 雷雨时，不能站在孤立的大树、电杆、烟囱和高墙下，不要乘坐敞篷车和骑自行车。避雨应选择有屏蔽作用的建筑或物体，如汽车、电车、混凝土房屋等。

⑦ 如果有人遭到雷击，应不失时机地进行人工呼吸和胸外心脏挤压，并送医院抢救。

4. 电气防火与防爆

电气火灾是电气设备因故障（如短路、过载、漏电等）产生过热，或者由于设备自身缺陷、施工安装不当、电气接触不良、雷击等引起的高温、电弧、电火花（如电焊火花飞溅、故障火花等）而导致的火灾。

（1）电气设备的防火措施

电气火灾通常是因为电气设备的绝缘老化、接头松动、过载短路等因素导致过热而引起的，尤其是在易燃、易爆场所，上述电气线路潜在危害更大。为防止电气火灾事故的发生，必须采取防火措施。

① 经常检查电气设备的运行情况。检查接头是否松动，有无电火花发生，电气设备的过载、短路保护装置性能是否可靠，设备绝缘是否良好。

② 合理选用电气设备，有易燃、易爆品的场所，安装使用电气设备时，应选用防爆电器，绝缘导线必须密封于钢管内，应按爆炸危险场所等选用、安装电气设备。

③ 保持安全的安装位置。保持必要的安全检查间距是电气防火的重要措施之一。为防止电气火花和危险高温引起火灾，凡能产生火花和危险高温的电气设备周围不应堆放易燃、易爆品。

④ 保持电气设备正常运行。电气设备运行中产生的火花和危险高温是引起电气火灾的主要原因，为控制过量的工作火花和危险高温，保证电气设备的正常运行，应由经培训考核合格的人员操作、使用和维护保养。

⑤ 通风。在易燃易爆危险场所运行的电气设备，应有良好的通风，以降低爆炸性气体混合的浓度，其通风系统应符合有关要求。

⑥ 接地。在易燃、易爆危险场所的接地比一般场所要求高，不论其电压高低，正常不带电装置均应按有关规定可靠接地。

（2）电气火灾的紧急处理步骤

① 切断电源。当电气设备发生火警时，首先要切断电源（用木柄消防斧切断电源进线），防止事故的扩大和火势的蔓延，以及灭火过程中发生触电事故。同时拨打 119 火警电话，向消防部门报警。

② 正确使用灭火器材。发生电火警时，绝不可用水或普通灭火器（如泡沫灭火器）去灭火，因为水和普通灭火器中的溶液都是导体，一旦电源未被切断，救火者就有触电的可能。所以，发生电火警时应该用干粉二氧化碳或“1211”灭火器灭火，也可以使用干燥的黄沙灭火。

应当注意：救火人员不要随便触碰电气设备及电线，尤其要注意断落到地上的电线。此时对于火警现场的一切线缆，都应按带电体处理。

（3）防爆

常见的与用电相关的爆炸有可燃气体、蒸汽、粉尘与助燃气体混合后遇火源而发生爆炸。为防止易燃易爆气体发生爆炸，必须制定严密的防爆措施，包括合理选用防爆电气设备和敷设电气线路，保持场所的良好通风；保持电气设备的正常运行，防止短路、过载；安装自动断电保护装置，使用便携式电气设备时应特别注意安全；防爆场所一定要选用防爆电机等防爆设备；采用三相五线制与单相三线制电源供电。

5. 安全用电常识

触电事故的发生，多数是不重视安全用电常识，不遵守安全操作规程以及电气设备受损和老化造成的。掌握安全用电常识，严格遵守操作规程，采取相应的防护措施是防止触电的首要条件。当发生触电事故时，应立即切断电源或用绝缘体将触电者与电源隔开，然后采取及时有效的措施对触电者进行救护。

防止触电事故的发生应综合采取一系列安全措施，除对从事电气工作的专业人员应进行专门教育、培训和制定严格的规章制度外，每一个人都应遵守安全操作规程。

（1）加强安全教育，树立“安全第一”的观念，使所有人员懂得安全用电的重大意义。

（2）遵守电工技术操作规程。

① 上岗时必须戴好规定的防护用品，一般不允许带电作业。工作前应详细检查所用工具是否安全可靠，了解场地、环境情况，选好安全工作位置。

② 各项电气工作要认真严格执行“装得安全，拆得彻底，检查经常，修理及时”的规定。在线路上、设备上工作时要切断电源，并挂上警告牌，验明无电后才能进行工作。不准无故拆除电气设备上的熔丝及过负荷继电器或限位开关等安全保护装置。机电设备安装或修理完工后在正式送电前必须仔细检查绝缘电阻及接地装置和传动部分的防护装置，使之符合安全检查要求。

③ 发生触电事故应立即切断电源，并采用安全、正确的方法立即对触电者进行救助和抢救。

④ 装接灯头时开关必须控制相线。临时线路敷设时应先接地线，拆除时应先拆相线。在使用电压高于 36V 的手电钻时，必须戴好绝缘手套，穿好绝缘鞋。使用电烙铁时，安放位置不得有易燃物或靠近电气设备，用完后要及时拔掉插头。工作中拆除的电线要及时处理好，带电的线头必须用绝缘带包扎好。

⑤ 高空作业时应系好安全带，扶梯脚应有防滑措施。登高作业时，工具、物品不准随便向下扔，必须装入工具袋内并以吊送式传递。地面上的人员应戴好安全帽，并离开施工区 2 米以外。

⑥ 雷雨或大风天气严禁在架空线路上工作。

⑦ 低压架空带电作业时应有专人保护，使用专用绝缘工具，戴好专用防护用品。低压架空带电作业时，人体不得同时接触两根线头，不得越过未采取绝缘措施的导线之间。在带电的低压开关柜（箱）上工作时，应采取防止相间短路及接地等安全检查措施。

⑧ 当电器发生火警时应立即切断电源。在未断电前，应用四氯化碳、二氧化碳或干粉灭火，严禁用水或普通酸碱泡沫灭火器灭火。

⑨ 配电间严禁无关人员入内。外单位参观时必须经有关部门批准，由电气工作人员带入。倒闸操作必须由专职电工进行，复杂的操作应由两人进行，一人操作，一人监护。

2.5.2　节约用电常识

随着国家电力工业的飞跃发展，工农业生产和人民群众的日常生活对用电的需求量也越来越大，但电力供应的缺口仍然很大。作为一名电气工作的从业人员，养成节约用电的习惯，推广节约用电的经验和方法，是义不容辞的责任。

1. 节约用电的科学管理方法

（1）加强电能管理，建立和健全合理的管理机构和制度。

（2）实行统筹兼顾，适当安排，确保重点，兼顾一般，择优供应的原则，保证电力供需平衡，对用电单位进行合理的电力分配。

（3）实行计划供用电，提高电能利用率。

（4）实行“削峰填谷”的负荷调整。供电部门根据用户的不同用电规律，合理地、有计划地安排各用户的用电时间，以降低负荷高峰，填补负荷低谷（即“削峰填谷”）。

（5）加强电力设备的运行维护和管理。

2. 节约用电的一般措施

（1）输配电节能

工农业生产中输配电的节能，主要涉及电力变压器的节能和配电线路的节能，这两项的损耗占工农业生产配电系统总损耗的 95%以上。

① 电力变压器的节能。合理选择电力变压器：选择节能的变压器，优先选择 SL7、ST、S9 等系列低损耗油浸式电力变压器；对防火要求较高或环境潮湿多尘的场所，应选择 SC6 等系列环氧树酯浇注的干式变压器；对具有化学腐蚀型气体、蒸汽或具有导电、可燃性粉尘、潮湿的场所，应选择 SL14 等系列密闭式变压器。合理地配置变压器的容量和数量，以减小电能损耗：对季节性负荷变化较大的，宜采用两台变压器、当负荷重时两台均运行，负荷轻时可断开一台，减少一台变压器的损耗；变压器的容量只要满足一、二级负荷的需要即可，计算负荷与额定容量的比值不宜过低，否则应更换较小容量的变压器。

② 配电线路的节能。配电线路网络状况、导线的种类、生产负荷的变化规律等因素都影响着配电线路的损耗，设法减少无功功率损耗是一项非重要的措施。

（2）电动机节能

电动机所消耗的电能约占全国总发电量的 60%~70%。电动机节能的主要措施有如下几种。

① 优先选用新型节能电动机，如 Y 系列。

② 提高电动机的运行水平。电动机是工厂用得最多的设备，电动机的容量应合理选择。要避免用大功率电动机去拖动小功率设备（俗称大马拉小车）的不合理用电情况，要使电动机工作在高效率的范围内。

③ 当电动机的负载经常低于额定负载的 40%时，要合理更换，以避免电动机经常处于轻载状态运行，或把正常运行时规定使用△接法的电动机改为 Y 接法，以提高电动机的效率和功率因数。对工作过程中经常出现空载状态的电气设备（例如拖动机床的电动机、电焊机等），可安装空载自动断电装置，以避免空载损耗。

④ 风机与水泵节电。风机、水泵一般容量较大，而且数量也较多，在工厂用电中占的比重相当大，因此节电潜力很大，风机、水泵节电的主要措施有：合理选择电动机的型号规格，使其与风机、水泵配置合理，提高运行效率；改善流量调节措施，减少流量调节损失；采用变频器控制电动机的转速来调节流量，取代采用挡板或阀控制流量的方法。

（3）提高功率因数

工矿企业在合理使用变压器、电动机等设备的基础上，还可装设无功补偿设备，以提高

功率因数。企业内部的无功补偿设备应装在负载侧，例如在负载侧装设电容器、同步补偿器等，可减小电网中的无功电流，从而降低线路损耗。

（4）推广和应用新技术，降低产品电耗定额

例如，采用远红外加热技术，可使被加热物体所吸收的能量大大增加，使物体升温快，加热效率高，节电效果好。远红外加热技术和硅酸铝耐火纤维材料配合使用，节电效果更佳。又如，采用硅整流器或晶闸管整流装置以代替其他整流设备，则可使整流效率提高。在工矿企业中有许多设备需要使用直流电源，如同步电机的励磁电源, 化工、冶金行业中的电解、电镀电源，市政交通电车的直流电源等。以前这些直流电源大多是采用汞弧整流器或交流电动机拖动直流发电机发电，它们的整流效率低，若改用硅整流器或晶闸管整流装置，则效率可大为提高，节电效果甚为显著。此外，采用节能型照明灯，在大电流的交流接触器上安装节电消声器（即直流无声运行），加强用电管理和做好节约用电的宣传工作等，也都是节约用电的重要措施。

（5）家庭节约用电

照明用电约占我国用电量的 5%左右，一些发达国家高达 14%，提高照明节电的效率是节约电能的一条重要途径。

① 合理选择高效率的电光源，如荧光灯、电子镇流器荧光灯、烯土三基色紧凑型荧光灯（节能灯）等。

② 充分利用自然光采光。

③ 采用节电照明控制电路，如楼梯、走廊的声光控制电路。

④ 电视机节电主要是控制好音量和亮度；电冰箱应放置在通风良好，远离热源的地方；洗衣机弱洗比强洗省电；电风扇运转速度越高，耗电越大，一般情况下电风扇低运转既可消暑纳凉，又可节电；使用空调器应合理控制室内温度，并注意定期清洗滤网。



问题研讨 —— 想一想

（1）人体触电有哪几种类型？试比较其危害程度。

（2）电流对人体的伤害与哪些因素有关？触电方式有哪些？常见的触电原因有哪些？怎样预防触电？

（3）何谓保护接地和保护接零？哪些电气设备的金属外壳要接地或接零？为什么在电源中性线上不允许安装开关或熔断器？

（4）为什么同一低压配电网中，不得将一部分电气设备采用保护接地而另一部分设备采用保护接零？

（5）一些金属外壳的家用电器（如电冰箱、洗衣机等）使用三芯插头和插座，而另一些非金属外壳的家用电器则使用两芯插头和插座，试说明其原因。

（6）安全用电要注意哪些事项？

（7）工业中节约用电的主要措施有哪些？在日常生活中，应如何注意安全用电与节约用电？

项目小结

1. 随时间按正弦规律周期性变化的电压、电流和电动势统称为正弦交流电。正弦交流电的三要素为：最大值、频率和初相位，根据三要素可以写出正弦量的瞬时值表达式，也可画出波形图。同频率正弦电量的相位关系由它们之间的相位差决定。

2. 用于表示正弦电量的复数称为相量，即用复数的模表示正弦电量的有效值；用复数的辐角表示正弦量的初相位。同频率的正弦量之间的关系可借助相量图表示。相量法是分析和计算交流电路的重要工具。掌握交流电瞬时值函数式与相量的转换关系。

3. 分析交流电路时，主要找出电路中各电量有效值关系、电压与电流相位关系及能量关系。

（1）对单一参数电路欧姆定律的相量式及功率分别为：

纯电阻电路：$\dot{U}=\dot{I}R$，$P=I^2R$

纯电感电路：$\dot{U}=\mathrm{j}\dot{I}X_\mathrm{L}$，（感抗 $X_\mathrm{L}=\omega L$），$P=0$，$Q_L=I^2X_\mathrm{L}$

纯电容电路：$\dot{U}=-\mathrm{j}\dot{I}X_\mathrm{C}$，（容抗 $X_\mathrm{C}=\dfrac{1}{\omega C}$），$P=0$，$Q_\mathrm{C}=-I^2X_\mathrm{C}$

其中，$\pm\mathrm{j}=1\angle\pm90^\circ$

（2）RLC 串联电路

电压与电流欧姆定律的相量式为：$\dot{U}=\dot{I}Z$

复阻抗：$Z=R+\mathrm{j}(X_\mathrm{L}-X_\mathrm{C})=|Z|\angle\varphi$，其中 $|Z|=\sqrt{R_2+(X_\mathrm{L}-X_\mathrm{C})^2}$，$\varphi=\arctan\dfrac{X_\mathrm{L}-X_\mathrm{C}}{R}$

电压相量关系为：$\dot{U}=\dot{U}_\mathrm{R}+\dot{U}_\mathrm{L}+\dot{U}_\mathrm{C}$

电压数值关系为：$U=\sqrt{U_\mathrm{R}^2+(U_\mathrm{L}-U_\mathrm{C})^2}$

有功功率：$P=UI\cos\varphi=I^2R$

无功功率：$Q=UI\sin\varphi=Q_\mathrm{L}-Q_\mathrm{C}=I^2X_\mathrm{L}-I^2X_\mathrm{C}$

视在功率：$S=UI=\sqrt{P^2+Q^2}$

阻抗角φ即电压与电流相位差角或功率因数角。

4. 功率因数是电力工业的一项重要经济指标，为了提高电源设备的利用率和减少线路损耗，应尽量提高电路的功率因数。提高功率因数的方法是在感性负载两端并联容性电器，用电容的无功功率 Q_C 对电感的无功功率 Q_L 进行补偿。

5. 相量形式的欧姆定律及基尔霍夫定律，只要把电路中的无源元件表示为复阻抗或复导纳（复阻抗的倒数），所有正弦量均用相量表示，那么讨论直流电路时所采用的各种网络分析方法、原理、定理都完全适用于线性正弦交流电路。

6. 电路谐振分 RLC 串联谐振和 RLC 并联谐振，其共同的特征是电路的电压和电流同相，电路对外呈现电阻性。$\omega L-\dfrac{1}{\omega C}=0$，谐振固有频率为：$f_0=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$，改变电路参数或电源频率，可使电路发生谐振。

串联谐振的主要特征有：电路阻抗最小：$Z_0 = R$；电流最大：$I_0=U/R$；电感、电容两端出现高压现象：$U_L = U_C=QU$，Q 为电路的品质因数。

并联谐振的主要特征有：电路的阻抗值最大；电流最小；支路的谐振电流很大，是总电流的 Q 倍，一般 Q 值为 100 左右。

谐振对电力系统不利，应避免谐振出现，但在无线电技术中却利用它实现选频等。品质因数 Q 越大，选频效果越好。

7. 目前电力系统普遍采用三相电路，三相电源的电动势是三相对称电动势，即幅值相同、频率相同、相位互差 120°。三相电源通常采用 Y 连接。

8. 三相对称负载为三相负载值相等、阻抗角相同。在三相对称负载作 Y、△接法时，线电压与相电压，线电流与相电流关系分别为：

Y 接法：$\dot{U}_L = \sqrt{3}\dot{U}_P\angle 30°$（对应的），$\dot{I}_L = \dot{I}_P$（对应的）

△接法：$\dot{U}_L = \dot{U}_P$（对应的），$\dot{I}_L = \sqrt{3}\dot{I}_P\angle(-30°)$（对应的）

三相对称负载星形连接时，中线电流为零，故可取消中线，构成三相三线制电路。若负载不对称时，应采用三相四线制，中线在任何情况都不能断开，以保证各相相电压对称，中线不能安装开关、熔断器等。

三相电路的有功功率、无功功率分别等于每相的有功功率之和。

在三相负载对称时，可用下列公式计算：

$$P = 3U_pI_p\cos\varphi = \sqrt{3}U_LI_L\cos\varphi$$

$$Q = 3U_pI_p\sin\varphi = \sqrt{3}U_LI_L\sin\varphi$$

$$S = \sqrt{P^2+Q^2} = \sqrt{3}U_LI_L$$

式中，φ是相电压和相电流的相位差。

9. 触电对人体的伤害主要有两种：电击和电伤。触电对人体的伤害程度与通过人体的电流大小、种类、持续时间、电流通过人体的途径及触电者的健康状况等因素有关。对人体各部分组织均不造成伤害的电压值称为安全电压。我国规定的安全电压为 36V、24V、12V、6V 等，供不同场合选用。

10. 人体的触电方式有单相触电、两相触电、跨步电压触电三种。防止触电事故的发生应综合采取一系列安全措施，应遵守安全操作规程。防止触电的主要措施有使用安全电压、电气设备的保护接地、保护接零以及在设备供电线路上安装低压漏电保护开关。同时还应注意防雷、防火和防爆。

11. 合理使用电能，采取有效措施提高电能的利用率。每位公民都应养成节约用电的良好习惯。

习　　题

2.1　某交流供电的频率 f=400Hz，试求其角频率 ω 和周期 T。

2.2　已知 $i = 100\sin(\omega t - \frac{\pi}{4})$ A。（1）试指出 I_m=？ φ_0=？（2）求 I。（3）求当 f=1000Hz，

t=0.375ms 时电流的瞬时值。

2.3　已知 $e_1 = E_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$，$e_2 = E_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{4})$，$f$=50Hz。试求 e_1 与 e_2 的相位差，并指出它们导前、滞后的关系。当 t=0.005s 时，e_1 与 e_2 各处于什么相位？

2.4　在高频电炉的感应圈中，通入电流 $i = 85\sin\left(1.256\times10^6 t + \frac{\pi}{3}\right)$A。试求此电流的角频率、频率、最大值、有效值和初相角。

2.5　正弦电流 $i = I_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})$，已知在 t=0 时 i_0=4.9A，试求该电流的有效值。

2.6　某正弦电压在 t=0 时为 220V，其初相为 $\frac{\pi}{4}$，求它的有效值。

2.7　某正弦电压的频率 f=50Hz，有效值 U=5$\sqrt{2}$ V，在 t=0 时电压的瞬时值为 5V，此刻电压在增加，求该电压瞬时值表达式。

2.8　下列各式是否正确？如不正确请指出错误。

（1）$u = 220\angle30^\circ$V；（2）$U = 220\sqrt{2}\sin(\omega t + 30^\circ)$ V；（3）$i = 10\sin(\omega t - 45^\circ) = 10e^{-j45^\circ}$ V；

（4）$I = 30\angle60^\circ$A；（5）$\dot{I} = 20e^{20^\circ}$ A。

2.9　两个正弦电流 i_1 与 i_2，它们的最大值都是 5A，当它们之间的相位差为 0°、90°、180°时，分别求它们的合成电流 i_1+i_2 的最大值。

2.10　有一额定电压 220V、额定功率 200W 的灯泡，接在 $u = 220\sqrt{2}\sin 314t$V 的电源上，试求：（1）流过灯泡的电流 I；（2）灯泡电阻 R；（3）若把该灯错接在 120V 的交流电源上，灯泡的电流和功率各为多少？

2.11　有一个灯泡接在 $u = 311\sin(314t + \frac{\pi}{2})$V 的交流电源上，灯丝炽热时电阻为 484Ω，试求流过灯丝的电流瞬时值表达式以及灯泡消耗的功率。

2.12　一个纯电感线圈的电感量 L=414mH，接在 $u = 275.8\sin(314t + \frac{\pi}{2})$V 的交流电源上，求电路的电压和电流的有效值；绘出电压、电流的相量图；求平均功率和无功功率。

2.13　已知一个电感线圈 L=35mH，接在电压为 110V、频率为 50Hz 的电源上，试求感抗 X_L、电流 i、有功功率 P、无功功率 Q，并画出相量图。

2.14　已知一电容电路 C=10μF，电流 $i = 0.1\sqrt{2}\sin(100t + 60^\circ)$A，试求该电路的容抗 X_C、电压 u_C，有功功率 P、无功功率 Q，并画出相量图。

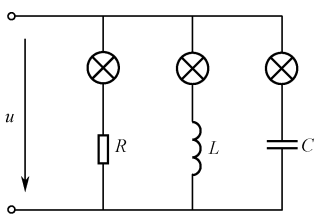


图 2-60

2.15　三个同样的白炽灯，分别与电阻、电感及电容串联后接在交流电源上，如图 2-60 所示。如果 R=X_L=X_C，试问灯的亮度是否一样？为什么？若将它们改接在直流电源上，灯的亮度各有什么变化？

2.16　已知负载上的电压 u=220$\sqrt{2}$ sin（314t+36.9°）V，负载电阻 R=4Ω，X_L=3Ω，试求通过负载的正弦交流电流 i。

2.17　在 RLC 串联交流电路中，已知 u=220$\sqrt{2}$ sin314tV，R=40Ω，L=197mH，C=100μF，求 i、u_R、u_L、u_C 和 P、Q、S。

2.18　在 RLC 串联交流电路中，已知：$u=220\sqrt{2}\sin(314t+66.9^0)$ V，R=16Ω，X_L=16Ω，X_C=4Ω，试求：（1）线路电流 I；（2）各元件上电压 u_R、u_L、u_C；（3）画出相量图；（4）电路的平均功率 P、无功功率 Q、视在功率 S 和功率因数 cosφ。

2.19　一个具有电阻的电感线圈，若接在频率 f=50Hz、U=12V 的交流电源上，通过线圈的电流为 2.4A，如将此线圈改接在 U=12V 的直流电源上，则通过线圈的电流为 4A。试求这个线圈的电阻、阻抗和感抗，并绘出阻抗三角形。

2.20　为了测定一个空心线圈的参数，在线圈两端加以频率 f=50Hz 的正弦电压，现测得电压 U=110V，电流 I=0.5A，功率 P=40W，试根据这些数据计算出线圈的电感和电阻。

2.21　在 RL 串联电路中，已知 $i=5\sqrt{2}\sin(t+20^o)$ A，L=10mH，$R=5\Omega$，试求 $\dot{U}_R$、$\dot{U}_L$、和 $\dot{U}$。

2.22　一个线圈接在 $U=120$V 的直流电源上，流过的电流 $I=20$A，若接在 f=50Hz、$U=220$V 的交流电源上，则通过的电流 $I=28.2$A，试求线圈的电阻 R 和电感 L。

2.23　将 R=13Ω、L=165mH 的线圈与 C=1μF 的电容器串联后接至 U=12V、f=500Hz 的交流电源上，求电路中的电流 I 及其与电源电压的相位差；并求线圈上的电压 U_1 与电容器上的电压 U_C，绘出电压、电流相量图。

2.24　已知负载上的电压相量 $\dot{U}=220\angle 37^o$ V，频率 f=50Hz，负载阻抗 $Z=4+\mathrm{j}3\Omega$，试求通过负载的正弦交流电流 i。

2.25　在 RLC 串联交流电路中，已知 R=16Ω，X_L=16Ω，X_C=4Ω，电路两端所加电源电压 $u=220\sqrt{2}\sin(314t+66.9^\circ)$ V，试求：（1）线路的电流相量 $\dot{I}$；（2）各元件上电压相量 $\dot{U}_R$、$\dot{U}_L$、$\dot{U}_C$；（3）画出相量图；（4）平均功率 P、无功功率 Q、视在功率 S 和功率因数 cosφ。

2.26　在图 2-61 所示电路中，已知 U=220V，R=6Ω，X_L=8Ω，X_C=19Ω，试求：电路的总电流 I，支路的电流 I_1、I_C；线圈支路的功率因数和电路的总功率因数。

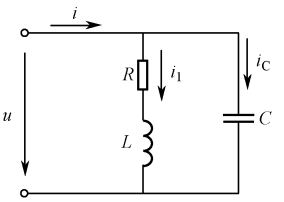


图 2-61

2.27　欲使功率为 40W、电压为 220V、电流为 0.65A 的荧光灯电路的功率因数提高到 0.92，应并联多大的电容器？这时电路的总电流是多少？（设电源频率为 50Hz）

2.28　已知荧光灯的功率为 40W，电压为 220V，电流为 0.65A，试计算（1）荧光灯支路的功率因数；（2）欲使整个电路的功率因数提高到 0.95，需并联的电容器 C 的值为多大？（3）若给 40W 荧光灯并联的电容器的电容值为 4.7μF 时，问此时的功率因数为多少？

2.29　一个电感线圈与电容器串联，组成收音机的选频电路，已知 L=0.3mH，可变电容 C 为 25～360pF。（1）问能否满足收听 535～1605kHz 中波段的要求？（2）设线圈的电阻 R=25Ω，求 f_{01}=535kHz 和 f_{02}=16055kHz 所对应的品质因数 Q_1、Q_2；（3）在哪一个频率下，收音机的选择性好？

2.30　RLC 串联谐振电路，已知 L=3mH，R=3Ω，C=0.33μF，电压 U=3V，试求电路的谐振频率 f_0、电流 I_0 及各元件上的电压 U_R、U_L、U_C。

2.31　在图 2-62 图所示的电路中，已知 R_1=30Ω，X_L=40Ω，R_2=80Ω，X_C=60Ω，电源电压 $u=100\sqrt{2}\sin\omega t$ V，试求 i_1，i_2 和 i，并作出电压和电流相量图。

2.32　电路如 2.63 图所示，已知，U=100V，R=3Ω，X_L=4Ω，X_C=2Ω，试求电路的有功功率 P、无功功率 Q 及功率因数 cosφ。

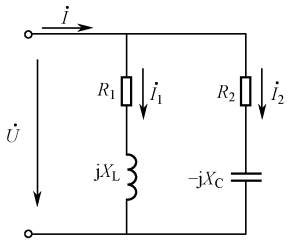


图 2-62

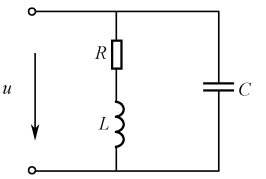


图 2-63

2.33　电路图 2-64 所示，已知 I_1=4A，I_2=9A，I=11.3A，U=120V，试求 R_1、R_2 及 X_L。

2.34　在图 2-65 所示的电路中，X_C=R，试问电感电压 u_1 与电容电压 u_2 的相位差是多少？

2.35　功率为 40W、功率因数为 0.5 的日光灯，接到 U=220V 工频交流电源上，试求：（1）日光灯的工作电流 I；（2）欲使电路的功率因数提高到 0.8，应并联多大的电容器？

2.36　某单相交流电源，额定容量 S_N=40kV·A，额定电压 U_N=220V，频率 f=50Hz，给照明电路供电，若负载都是 40W 的日光灯，其功率因数为 0.5。试求：（1）日光灯最多可以点多少盏？（2）用补偿电容将功率因数提高到 1，这时电路的总电流是多少？需并联多大的补偿电容；（3）功率因数提高到 1 以后，除供给以上日光灯外，若保持电源在额定情况下工作，还可以多点 40W 的日光灯多少盏？

2.37　在图 2-66 所示的电路中，已知，$\dot{U}_{S1}=100\angle 53.1^\circ$V，$\dot{U}_{S2}=100\angle 0^\circ$V，$R$=6Ω，$X_L$=8Ω，$X_C$=8Ω，分别用节点电压法和戴维南定理求图中的电流 $\dot{I}$。

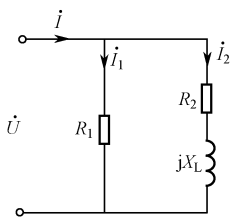


图 2-64

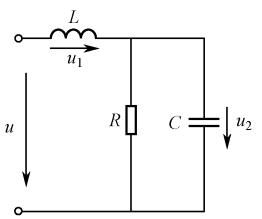


图 2-65

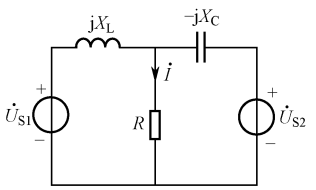


图 2-66

2.38　已知 Y 形连接的三相电源，设线电压 $u_{UV}=380\sqrt{2}\sin(\omega t-30^o)$V，试写出 u_{VW}、u_{WU}、u_U、u_V、u_W 的表达式。

2.39　现有 220V、60W 的白炽灯 99 个，应如何将它们接入三相四线制电路？求负载在对称情况下的线电流及中线电流。

2.40　三个完全相同的线圈采用星形连接，接在线电压为 380V 的三相电源上，线圈的电阻 R=3Ω，感抗 X_L=4Ω。试求：（1）各线圈的电流；（2）每相功率因数；（3）三相总功率。

2.41　三相对称负载，每相电阻 R=8Ω，感抗 X_L=6Ω，（1）如果将负载连成 Y 形接于线电压 U_L=380V 的三相电源上，试求相电压、相电流及线电流，并作相量图。（2）如将负载连成△形接于线电压 U_L=220V 的电源上，试求相电压、相电流及线电流并将所得结果与（1）的结果进行比较。

2.42　三相对称负载的功率为 5.5kW，三角形连接在线电压为 220V 的三相电源上，测得线电流为 19.5A。求：（1）负载的相电流、功率因数、每相阻抗值；（2）若将该负载改为星形连接，接至线电压为 380V 的三相电源上，则负载的相电流、线电流、吸收的功率各为多少？

2.43　三相对称负载连接成△形，每相电阻 R=4Ω，感抗 X_L=3Ω，接在线电压 U_L=190V 的三相电源上，试求三相负载吸收的总功率 P。

2.44　不对称三相负载连接成 Y 形，各相负阻抗分别为：Z_U=Z_V=（17.3＋j10）Ω，Z_W = 10Ω，三相电源线电压 $u_{UV}=380\sqrt{2}\sin(314t+30^\circ)$ V。试求各相负载电流及中线电流。

2.45　在图 2-67 所示的电路中，设三相负载对称，电流表 A_1 的读数为 10A，问电流 A_2 的读数为多少？

2.46　在图 2-68 所示的电路中，设三相负载对称连接成△形，已知：U_L=220V，I_L=17.3A，三相功率 P=4.5kW，试求：（1）每相负载的电阻和感抗；（2）当 U、V 相之间的负载断开时，图中各安培计的读数和总功率 P；（3）当 U 线断开时，图中各安培计的读数和总功率。

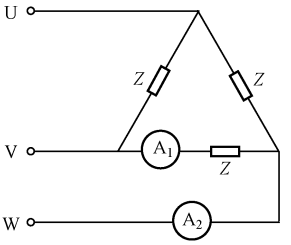


图 2-67

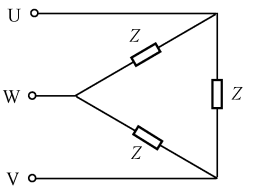


图 2-68

2.47　有一台三相电动机，三相绕组作△形连接后接在线电压 U_L=380V 的三相电源上，从电源取用的功率 P=5kW，功率因数 cosφ=0.76，求相电流和线电流。如果将此电动机改接成 Y 形，仍接在上述电源上，此时的相电流、线电流和总功率各是多少？

2.48　在线电压 U_L=380V 的三相电源上，接两组电阻性对称负载，图 2-69 所示，试求线路电流 I。

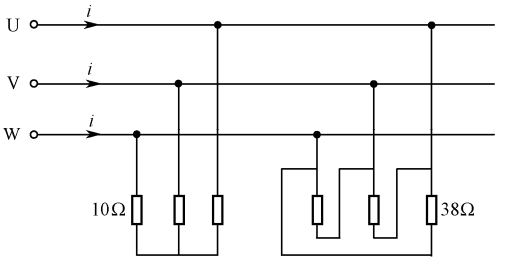


图 2-69

项目 3　线性电路过渡过程分析与测试



项目内容

1. 线性电路的过渡过程及换路定律；电路的暂态、稳态及时间常数的物理意义；
2. 一阶电路的零状态响应；
3. 一阶电路的零输入响应；
4. 一阶电路的全响应。



知识目标

1. 了解线性电路的过渡过程；
2. 掌握线性电路的过渡过程的换路定律；
3. 理解“三要素法”的三个量求解方法。



能力目标

1. 会用“三要素法”法求解一阶电路的零状态响应、零输入响应和全响应；
2. 会使用灵敏电流计、示波器测试一阶线性电路过渡信号。



情感目标

1. 通过“感性认识—理性思考—知识提升与应用”的学习过程，逐步培养学生勤观察、勤思考、好动手的学习与工作习惯，并具有分析问题和解决问题的能力；

2. 逐步提高学生的专业意识、培养其高度的责任心，遵章守纪、规范操作，使学生养成良好的科学态度和求是精神；

3. 锻炼信息、资料搜集与查找的能力。

任务 3.1　线性电路过渡过程的认识与测试



任务描述

在具有储能元件电容和电感的电路中，当电路的工作条件发生变化时，由于储能元件储

存能量的变化，电路从原来的稳定状态，经历一定时间，变换到新的稳定状态，这一变换过程称为过渡过程。本任务学习线性电路过渡过程中的有关概念、换路定律、初始值的计算及线性电路过渡过程的测试。

任务目标

了解线性电路过渡过程，理解线性电路过渡过程的概念。掌握换路定律、初始值的计算及过渡过程的测试。

任务实施

现象观察 —— 看一看

连接图 3-1 所示电路，图中的电源电压 U_S=12V，电阻 R=100kΩ，EL 为 12V/2W 的小灯泡，电容 C=1000μF/25V 的电解电容。在 t=0 时，合上开关 S，仔细观察小灯泡亮度变化情况，并用慢扫描示波器观察电阻两端电压 u_R、电容器两 u_C 的变化情况。

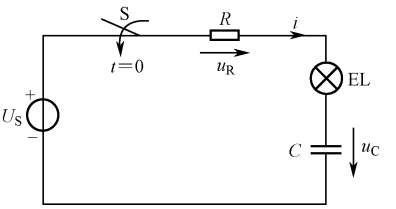


图 3-1　RC 电路过渡过程电路图

知识链接 —— 学一学

在日常生活中，任何车辆启动时，车速总是从零开始逐渐上升的，经过一段时间后，才能达到一定的运行状态。车辆的静止是一种稳定状态，车辆的匀速运动是另一种稳定状态。车辆启动或停止的过程，或者更广泛地说，车辆加速或减速的过程，则是一种稳定状态到另一种稳定状态的过渡过程。

电路中也存在类似的过渡过程。前面几个项目介绍的是电路的稳定状态，即电路中的电流和电压在给定的条件下已达到某一稳定值的状态。在直流电路中，电压和电流都是不随时间变化的恒定量；而在正弦交流电路中，电压和电流都是时间的正弦函数，而且其最大值是不随时间变化的恒定量。对电路的这种稳定状态（简称为稳态）的研究，一般称为电路的稳态分析。

电路的过渡过程通常是很短暂的（几毫秒甚至几微秒），所以又称为暂态过程。在暂态过程中，原来的状态被破坏，新的状态在建立，电路处于急剧地变化之中，它与稳定状态的物理现象有很大的差别。研究电路在暂态过程中电压和电流随时间的变化规律，称为电路的暂态分析。

研究电路中的过渡过程是有实际意义的。例如，电子电路中常利用电容器的充放电过程来完成积分、微分、多谐振荡等，以产生或变换电信号。而在电力系统中，由于过渡过程的出现将会引起过电压或过电流，若不采取一定的保护措施，就可能损坏电气设备，因此，需要认识过渡过程的规律，从而利用它的特点，防止它的危害。

3.1.1 过渡过程的概念

自然界中的物质运动从一种稳定状态（处于一定的能态）转变到另一种稳定状态（处于另一种能态）需要一定的时间，例如电动机从静止状态启动，到某一恒定转速要经历一定的时间，这就是加速过程；同样当电动机制动时，它的转速从某一恒定转速下降到零，也需要减速过程。这就是说物质从一种状态过渡到另一种状态是不能瞬间完成的，需要有一个过程，即能量不能发生跃变。过渡过程就是从一种稳定状态转变到另一种稳定状态的中间过程。电路从一种稳定状态转变到另一种稳定状态，也可能经历过渡过程。

为了了解电路产生过渡过程的内因和外因，下面观察一个实验现象。图 3-2 所示的电路，三个并联支路分别为电阻、电感、电容与灯泡串联，S 为电源开关。

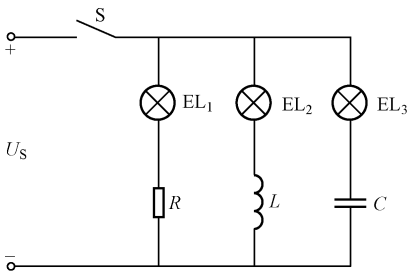


图 3-2　过渡过程演示电路

当闭合开关 S 时，发现电阻支路的灯泡 EL_1 立即发光，且亮度不再变化，说明这一支路没有经历过渡过程，立即进入了新的稳态；电感支路的灯泡 EL_2 由暗渐渐变亮，最后达到稳定，说明电感支路经历了过渡过程；电容支路的灯泡 EL_3 由亮变暗直到熄灭，说明电容支路也经历了过渡过程。当然，若开关 S 状态保持不变（断开或闭合），就观察不到这些现象。

由此可知，产生过渡过程的外因是接通了开关，但接通开关并非都会引起过渡过程，如电阻支路。产生过渡过程的两条支路都存在储能元件（电感或电容），这是产生过渡过程的内因。在电路理论中，通常把电路状态的改变（如通电、断电、短路、电信号突变、电路参数的变化等）统称为换路，并认为换路是立即完成的。

综上所述，产生过渡过程的原因有两个方面，即外因和内因。换路是外因，电路中有储能元件（也叫动态元件）是内因。

3.1.2 换路定律

分析电路的过渡过程时，除应用基尔霍夫电流、电压定律和元件伏安关系外还应了解和利用电路在换路时所遵循的规律（即换路定律）。

通常规定换路是瞬间完成的。如将换路发生的时刻定为 t=0，于是就把换路前的终了瞬间记为 t=0$_-$，而把换路后的初始瞬间记为 t=0$_+$，0$_-$和 0$_+$在数值上都等于 0。

换路定律是指一个具有储能元件的电路在换路瞬间，电容元件的端电压不能跃变，电感元件的电流不能跃变。

从能量的观点分析：电容的电场能量：$W_C=\frac{1}{2}CU_C^2$，电感的磁场能量 $W_L=\frac{1}{2}LI_L^2$，式中电容 C 和电感 L 都不随时间而改变。假设电容的电压 u_C 可以跃变，则电容元件储存的电场能量 W_C 也要发生跃变，即在 $\Delta t\to 0$ 一段小时间内，ΔW_C 为一有限值，此瞬间从电源吸收的功率 $p=\lim\limits_{\Delta t\to 0}\frac{\Delta W_C}{\Delta t}=\infty$。事实上一般没有能在瞬间提供无限大功率的电源，这说明电容元件的端电

压不可能跃变。同样道理电感电流的跃变也是不可能的。

换路定律的数学表达式为：

$$\left.\begin{aligned} u_C(0_+) &= u_C(0_-) \\ i_L(0_+) &= i_L(0_-) \end{aligned}\right\} \tag{3.1}$$

在暂态分析中，通常用 u_C（0_+）和 i_L（0_+）来描述电路的初始状态。这是因为一旦已知 u_C（0_+）和 i_L（0_+）后，电路其他部分的电压、电流在 t=0_+时的值，都可以通过它们求出来。即用电容电压和电感电流以及电路的输入（电压源或电流源），完全可以确定电路其他的电压、电流。

换路瞬间储能元件的等效电路：换路前，如果储能元件没有储能，则在换路瞬间（t=0_+时）电容相当于短路，而电感相当于开路，如图 3-3 所示。



（a）电容等效电路　　（b）电感等效电路

图 3-3　换路前元件没有储能，在 t=0_+时的等效电路

换路前，如果储能元件储有能量，则在换路瞬间（t=0_+时），u_C（0_+）=u_C（0_-）=U_0 和 i_L（0_+）= i_L（0_-）=I_0，电容相当于电压值为 U_0 的恒压源，电感相当于电流值为 I_0 的恒流源，如图 3-4 所示。

根据换路定律，可以确定 u_C 和 i_L 的初始值 u_C（0_+）和 i_L（0_+）。电路的其他部分的电压、电流的初始值，还需要应用电路定律进行计算。为直观起见，在计算时，画出 t=0_+时的等效电路。



（a）电容等效电路　　（b）电感等效电路

图 3-4　换路前元件储有能量，在 t=0_+时的等效电路

3.1.3　初始值的计算

换路后的最初一瞬间（即 t=0_+时刻）的电流、电压值统称为初始值。研究线性电路的过渡过程时，电容电压的初始值 u_C（0_+）及电感电流的初始值 i_L（0_+）可按换路定律来确定。其他可以跃变的量的初始值，要根据 u_C（0_+）、i_L（0_+）和应用 KCL、KVL 及欧姆定律来确定。

对于较复杂的电路，为了便于求得初始条件，在求得 u_C（0_+）和 i_L（0_+）后，可将电容元件代之以电压为 u_C（0_+）的电压源，将电感元件代之以电流为 i_L（0_+）的电流源。经这样替换过的电路称为原电路在 t=0_+时的等效电路，它为一个电阻性电路，可按电阻性电路进行分析计算。

应用举例 —— 练一练

例 3.1 在图 3-5（a）所示的电路中，已知 U_S=12 V，R_1=4 kΩ，R_2=8kΩ，C=1μF，开关 S 原来处于断开状态，电容上电压 u_C（0₋）=0。求开关 S 闭合后 t=0₊时各电流及电容电压的数值。

解 选定有关参考方向如图 3-5 所示。

（1）由已知条件可知：u_C（0₋）=0。

（2）由换路定律可知：u_C（0₊）=u_C（0）=0。

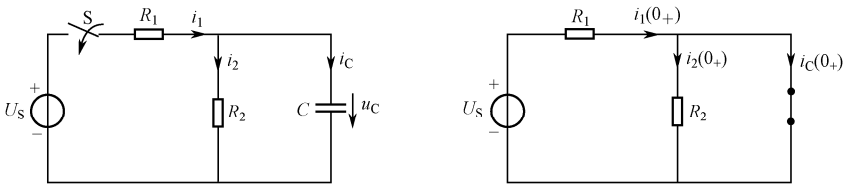
（3）求其他各电流、电压的初始值。

画出 t=0₊时刻的等效电路，如图 3-5（b）所示。由于 u_C（0₊）=0，所以在等效电路中电容相当于短路。

故有

$$i_2(0_+)=\frac{u_C(0_+)}{R_2}=\frac{0}{R_2}=0(\mathrm{V})\ ,\quad i_1(0_+)=\frac{U_S}{R_1}=\frac{12}{4\times10^3}=3(\mathrm{mA})$$

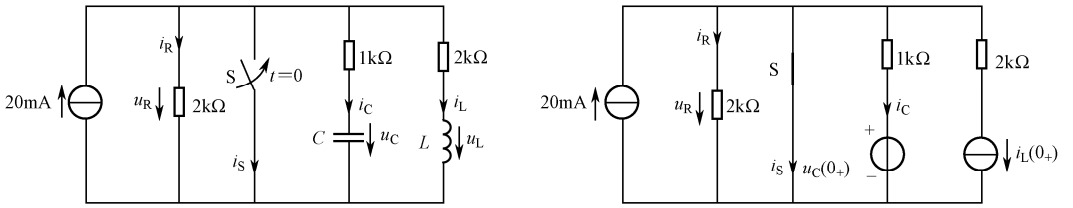
由 KCL 有　　i_C（0₊）=i_1（0₊）−i_2（0₊）=3−0=3(mA)



（a）电路原理图　　（b）t=0₊时的等效电路图

图 3-5　例 3.1 电路图

例 3.2 在图 3-6 所示的电路中，开关 S 闭合前电路已处于稳态。试确定开关 S 闭合后的初始值瞬间的电压 u_C、u_L 和电流 i_L、i_C、i_R 及 i_S 的初始值。



（a）电路原理图　　（b）t=0₊时的等效电路图

图 3-6　例 3.2 的图

解 在 t=0₋时（即换路前），电路已处于稳态，对直流恒流源来说，电容相当于开路，电感相当于短路，各电压和电流可依直流稳态电路计算出来。

$$i_S\text{（0₋）}=0(\mathrm{A})$$

$$i_C\text{（0₋）}=0(\mathrm{A})$$

$$i_R(0_-)=\frac{2}{2+2}\times20=10(\mathrm{mA})$$

$$i_L(0_-)=\frac{2}{2+2}\times 20=10(\text{mA})$$

u_R（0_-）=2kΩ×10mA=20(V)，u_C（0_-）=u_R（0_-）=20(V)，$u_L(0_-)$=0V

开关 S 闭合后，在 t=0_+时，电容、电感已有初始储能，所以在换路瞬间，电容相当于恒压源，电感相当于恒流源，作出等效电路如图 3-6（b）所示。依此电路可求出各电压、电流初始值。

由换路定律得：

$$u_C(0_+)=u_C(0_-)=20(\text{V}),\quad i_L(0_+)=i_L(0_-)=10(\text{mA})$$

其他电流、电压计算如下：

$$i_R(0_+)=0(\text{A})$$

$$i_C(0_+)=-u_C(0_+)/1\text{k}\Omega=-20\text{V}/1\text{k}\Omega=-20(\text{mA})$$

由 KCL 得：

$$20=i_R(0_+)+i_S(0_+)+i_C(0_+)+i_L(0_+)$$

则

$$i_S(0_+)=30\text{mA},\quad u_R(0_+)=0(\text{V})$$

由 $i_L(0_+)\times 2+u_L(0_+)=0$，得：$u_L(0_+)=-10\times 2=-20$（V）

将计算结果填表 3-1 中。

表 3-1　例 3.2 计算结果

物理量 / 瞬间	i_R	i_S	i_C	i_L	u_R	u_C	u_L
t=0_-	10mA	0	0	10mA	20V	20V	0
t=0_+	0	30mA	−20mA	10mA	0	20V	−20V

通过以上例题表明：虽然电容元件上的电压 u_C 是不能跃变的，但其中电流 i_C 发生了跃变；电感中的电流应是不能跃变的，但其上的电压 u_L 发生了跃变。至于纯电阻电路中的电压和电流都可以跃变。那么，为了计算 t=0_+时各电压、电流的初始值，只需计算 t=0_-时的电容电压 $u_C(0_-)$和电感电流 $i_L(0_-)$即可，不必去计算 t=0_-时其余的电压和电流值，因为它们都与初始值无关。



问题研讨 —— 想一想

由换路定律知，在换路瞬间电感上的电流、电容上的电压不能跃变，那么对其余各物理量，如电容上的电流，电感上的电压及电阻上的电压、电流是否也遵循换路定律？

任务 3.2　一阶线性电路过渡过程的分析与测试



任务描述

如果电路中仅含有一个储能元件或经化简后只含有一个独立储能元件，这种电路称为一

阶电路。一阶电路是最简单、最常见的暂态电路。本任务对一阶线性电路的过渡过程进行分析与测试。

任务目标

了解一阶线性电路的概念。掌握“三要素法”分析一阶线性电路的零状态响应、零输入响应和全响应，并能进行测试。

任务实施

知识链接 —— 学一学

3.2.1 一阶电路的零状态响应

若在一阶电路中，换路前储能元件没有储能，即 $u_C(0_-)$、$i_L(0_-)$都为零，此情况下由外加激励而引起的响应称为零状态响应。

1. RC 串联电路的零状态响应

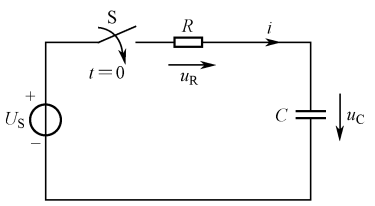


图 3-7 RC 电路的零状态响应电路

在图 3-7 所示的电路中，开关闭合前，电容 C 上没有充电。t=0 时刻开关 S 闭合。在图示的参考方向下，由 KVL 有

$$u_R+u_C=U_S \tag{3.2}$$

将各元件的伏安关系 $u_R=iR$ 和 $i=C\dfrac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}$ 代入式（3.2）中得：

$$RC\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}+u_C=U_S \tag{3.3}$$

式（3.3）是一阶常系数非齐次线性微分方程，用解微分方程的方法求可得：

$$u_C(t)=u_C(\infty)+A\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \tag{3.4}$$

式中，$\tau=RC$，当 R 的单位为欧姆（Ω），C 的单位为法拉（F）时，τ 单位是秒（s），把 τ 称为时间常数。积分常数 A 可由电路的初始条件来确定，如果已知 t=0_时的 $u_C(0_-)$，则可根据换路定律求得 $u_C(0_+)=u_C(0_-)$，将 t=0+时的 u_C 的初始值 $u_C(0_+)$代入式（3.4）得：

$$u_C(0_+)=u_C(\infty)+A$$
$$A=u_C(0_+)-u_C(\infty)$$

则

$$u_C(t)=u_C(\infty)+\left[u_C(0_+)-u_C(\infty)\right]\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \tag{3.5}$$

由上式可看出，只要知道 $u_C(0_+)$、$u_C(\infty)$和 τ这三个要素，就可以方便地得出电路的全响应

$u_C(t)$。这种利用“三要素”来求解一阶线性微分方程全解的方法，称为“三要素法”，用它分析 RC、RL 一阶电路的暂态过程时，方法简便且物理意义清楚。

应注意：如果 RC 电路比较复杂，电路中各电压和各电流都可以应用三要素法求解。只要求出其初始值、稳态值和时间常数这三个要素，根据式（3.5）就可以求出其全响应，因此，RC 串联电路的时域响应一般式可表示为：

$$f(t)=f(\infty)+\left[f(0_+)-f(\infty)\right]\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \tag{3.6}$$

式中，$f(t)$为电路电压或电流的时域响应；$f(\infty)$为换路后电路已进入稳态时，即 $t=\infty$时电路电压或电流的稳定值；$f(0_+)$为换路后电路电压或电流的初始值；τ为换路后电路的时间常数，显然，对一个 RC 电路来说，各电压、电流的时间常数是同一个。

下面利用“三要素法”分析图 3-7 所示的电路零状态响应。

零状态是指电路在 $t=0_-$时，储能元件无储能，即图 3-7 中 $u_C(0_-)=0$。在 $t=0$ 时，闭合开关 S，输入电压 U_S，$t\geqslant 0$ 时电路的零状态响应，用“三要素法”求解。

求初始值：根据换路定律，$u_C(0_+)=u_C(0_-)=0$，则

$$i(0_+)=\frac{U_S-u_C(0_+)}{R}=\frac{U_S}{R}$$

求稳态值：换路后，$t=\infty$时，$u_C(\infty)=U_S$，$i(\infty)=0$；

求时间常数：换路后电路的时间常数：$\tau=RC$。

由式（3.6）求得 RC 串联电路的零状态响应分别为：

电容电压的零状态响应为：

$$u_C=U_S-U_S\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}=U_S\left(1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \tag{3.7}$$

电流的零状态响应为：

$$i(t)=\frac{U_S}{R}\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \tag{3.8}$$

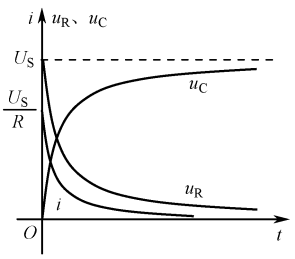


图 3-8　RC 电路的零状态响应曲线

电阻电压的零状态响应为：

$$u_R(t)=Ri=U_S\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \tag{3.9}$$

当然，由于 $i=C\dfrac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}$，因此电流也可由 $u_C(t)$求出，结果与式（3.8）完全相同。

画出式（3.7）、式（3.8）、式（3.9）的曲线，如图 3-8 所示。



应用举例 —— 练一练

例 3.3　如图 3-7 所示的电路中，已知：U_S=220V，R=200Ω，C=1μF，电容事先未充电，在 t=0 时合上开关 S。求：（1）电路的时间常数；（2）最大充电电流；（3）u_C、u_R 和 i 的表达式；（4）画出 u_C、u_R 和 i 随时间的变化曲线。

解　（1）时间常数为：

$$\tau=RC=200\times1\times10^{-6}=2\times10^{-4}\text{s}=200\mu\text{s}$$

（2）最大充电电流为：

$$i_{\max}=\frac{U_S}{R}=\frac{220}{200}=1.1(\text{A})$$

（3）u_C、u_R、i 的表达式为：

$$u_C(t)=U_S-U_S e^{-\frac{t}{\tau}}=220\times\left(1-e^{-\frac{t}{200\times10^{-6}}}\right)=220\times\left(1-e^{-5\times10^3 t}\right)(\text{V})$$

$$u_R(t)=U_S e^{-\frac{t}{\tau}}=220\times e^{-\frac{t}{200\times10^{-6}}}=220\times e^{-5\times10^3 t}\ (\text{V})$$

$$i(t)=\frac{U_S}{R}e^{-\frac{t}{\tau}}=\frac{220}{200}e^{-\frac{t}{200\times10^{-6}}}=1.1e^{-5\times10^3 t}(\text{A})$$

（4）画出 u_C、u_R、i 的曲线，如图 3-9 所示。

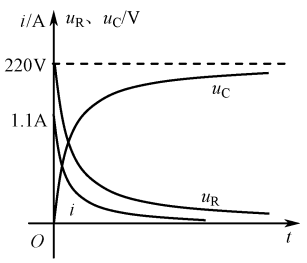


图 3-9　例 3.3 的响应曲线

从上面的讨论可以看出，RC 串联电路的零状态时域响应（电压或电流）都是随时间按指数规律增长或者衰减的变化过程。理论上，只有当 $t\to\infty$ 时，指数函数才能到达稳定状态，但指数函数开始变化得比较快，以后越来越慢。从表 3-2 中可以看出：$t=\tau$ 时，电容电压从零值充到稳态值的 63.2%；$t=3\tau$ 时，电容电压可充电到稳态值的 95%；$t=5\tau$ 时，电容电压充电到稳态值的 99%以上。工程上，一般认为暂态过程（3τ~5τ）时间就已经结束，进入了稳定状态。

表 3-2　指数函数随时间变化情况

t	0	τ	3τ	5τ
$1-e^{-\frac{t}{\tau}}$	0	0.632	0.950	0.993
$e^{-\frac{t}{\tau}}$	1	0.368	0.050	0.00674

时间常数越小，暂态过程越短；反之则过程越长。*RC* 电路的时间常数是由电阻值和电容量乘积确定的。*R* 或 *C* 越大，则 τ 越大，暂态过程历时就越长。这是因为 *C* 越大，电容存储的电场能量越多，充电时间就越长；而 *R* 越大，则电荷移动的阻力越大（或者单位时间内消耗的能量越小），所以充电的时间也要长。改变电路参数 *R* 及 *C* 的大小，就可以改变暂态过程经历时间的长短。

2. RL 串联电路的零状态响应

在图 3-10 所示的电路中，开关 S 未接通时电流表读数为 0，即 i_L（0_）=0。当 t=0 时，S 接通，电流表的读数由零增加到一稳定值。这是电感线圈储存磁场能量的物理过程。

S 闭合后，在电路给定的参考方向下，不计电流表的内阻，根据 KVL 得：

$$u_R+u_L=U_S$$

根据元件的伏安关系得：

$$i_L R+L\frac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t}=U_S$$

即

$$i_{\mathrm{L}}+\frac{L}{R}\times\frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{L}}}{\mathrm{d}t}=\frac{U_{\mathrm{S}}}{R} \tag{3.10}$$

式中，$\tau=L/R$，当电阻 R 的单位为欧姆（Ω），电感 L 的单位为亨利（H）时，则τ的单位为秒（s）。

式（3.10）与式（3.3）两方程形式相同，都是一阶常系数非齐次线性微分方程，只是所求函数和常数项代表的物理量不同，所以微分方程的全解形式也应完全一样。因此，可以直接写出本微分方程的全解（全响应）为：

$$i_{\mathrm{L}}(t)=i_{\mathrm{L}}(\infty)+\left[i_{\mathrm{L}}(0_{+})-i_{\mathrm{L}}(\infty)\right]\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \tag{3.11}$$

RL 电路中其他各电流、电压也都可以应用三要素法求解，且具有相同的时间常数 τ。RL 串联电路的时间常数的时域响应一般也可以表示为：

$$f(t)=f(\infty)+\left[f(0_{+})-f(\infty)\right]\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \tag{3.12}$$

下面利用“三要素法”分析图 3-10 所示的电路零状态的响应。

换路前终了瞬间电感没有储能，即 $i_{\mathrm{L}}(0_{-})=0$，处于零状态。在 $t=0$ 时，闭合开关 S，输入 U_{S}，$t\geqslant 0$ 时电路的零状态响应，用“三要素法”求解。

求初始值：根据换路定律，$i_{\mathrm{L}}(0_{+})=i_{\mathrm{L}}(0_{-})=0$

求稳态值：换路后，$t=\infty$ 时，$i_{\mathrm{L}}(\infty)=U_{\mathrm{S}}/R$

求时间常数：换路后电路的时间常数为 $\tau=L/R$

RL 串联电路的零状态响应分别为：

$$i_{\mathrm{L}}=\frac{U_{\mathrm{S}}}{R}+\left(0-\frac{U_{\mathrm{S}}}{R}\right)\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t}=\frac{U_{\mathrm{S}}}{R}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t}\right) \tag{3.13}$$

$$u_{\mathrm{R}}=Ri=U_{\mathrm{S}}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t}\right) \tag{3.14}$$

$$u_{\mathrm{L}}=L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}=U_{\mathrm{S}}\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t} \tag{3.15}$$

画出式（3.13）、式（3.14）、式（3.15）的曲线，如图 3-11 所示。

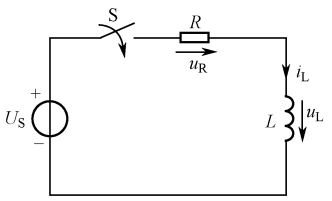


图 3-10　一阶 RL 电路零状态响应电路

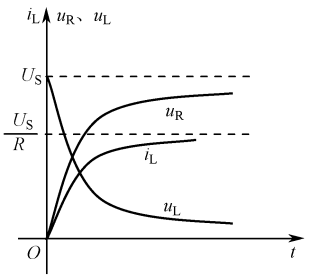


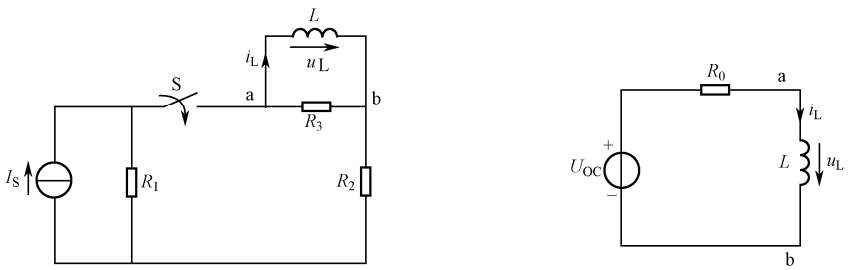
图 3-11　一阶 RL 电路零状态响应波形



应用举例 —— 练一练

例 3.4　在图 3-12（a）所示的电路中，$I_{\mathrm{S}}=2\mathrm{A}$，$R_1=R_2=40\Omega$，$R_3=20\Omega$，$L=2\mathrm{H}$，$i_{\mathrm{L}}(0_{-})=0$，

t=0 时开关 S 闭合。求 $t \geqslant 0$ 时，i_L 和 u_L 的零状态响应。



（a）电路图　　（b）等效电路图

图 3-12　例 3.4 图

解　$t \geqslant 0$ 时，开关 S 已闭合，应用戴维南定理将图简化为图 3-11（b）所示的等效电路，其中 R_0 为上图电路中以电感 L 为负载的有源二端网络的等效电阻，U_{OC} 为其开路电压。

$$R_0 = (R_1 + R_2) // R_3 = \frac{(R_1 + R_2)R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{(40+40)\times 20}{40+40+20} = 16(\Omega)$$

$$U_{OC} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} I_S\right) R_3 = \frac{40}{100} \times 2 \times 20 = 16(\mathrm{V})$$

由于

$$i_L（0_+）= i_L（0-）= 0$$

$$i_L(\infty) = \frac{U_{OC}}{R_0} = \frac{16}{16} = 1(\mathrm{A})$$

$$\tau = \frac{L}{R_0} = \frac{2}{16} = \frac{1}{8}(\mathrm{s})$$

则

$$i_L = 1 + (0-1)\mathrm{e}^{-8t} = 1 - \mathrm{e}^{-8t}(\mathrm{A})$$

$$u_L = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = 2 \times \frac{\mathrm{d}(1-\mathrm{e}^{-8t})}{\mathrm{d}t} = 16\mathrm{e}^{-8t}(\mathrm{V})$$

3.2.2　一阶电路的零输入响应

电路在无输入激励的情况下，仅由电路元件原有储能激励所产生的电路的响应，称为零输入响应。

1. RC 串联电路的零输入响应

图 3-13 的电路是一 RC 串联电路，换路前电路已处于稳定状态，电容器上已充有电压 U_S。在 t=0 时，开关 S 从位置 2 合到位置 1，使电路脱离电源，此时电容器 C 的初始储能作为电路的内部激励，在电路中产生电压、电流的暂态过程，直到全部储能在电阻 R 上消耗掉为止。

用三要素法确定零输入响应是很简便的。由于换路后无输入激励，所以 $u_C(\infty)$=0，又因 $u_C(0_-)=U_S$，所以 $u_C(0_+)=u_C(0_-)=U_S$，$\tau=RC$，由式（3.8）得

$$u_{\mathrm{C}}(t)=U_{\mathrm{S}}\mathrm{e}^{-\frac{1}{RC}t} \tag{3.16}$$

$$i=C\frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{C}}}{\mathrm{d}t}=-\frac{U_{\mathrm{S}}}{R}\mathrm{e}^{-\frac{1}{RC}t} \tag{3.17}$$

$$u_{\mathrm{R}}=Ri=-U_{\mathrm{S}}\mathrm{e}^{-\frac{1}{RC}t} \tag{3.18}$$

式（3.17）、式（3.18）中的负号表示电流 i 和电阻电压 u_R 的实际方向与图示方向相反。图 3-14 中画出了 u_{C}（t）、i（t）、u_{R}（t）的波形图，它们都是随时间趋于零的指数曲线。

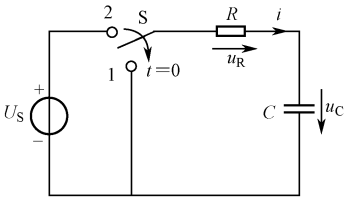


图 3-13　一阶 RC 电路的零输入响应电路

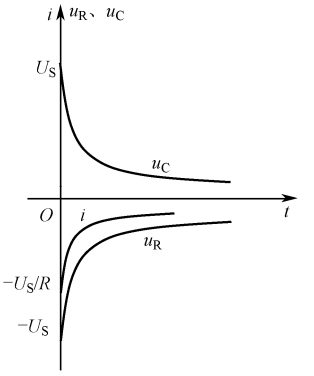


图 3-14　一阶 RC 电路零输入响应波形

例 3.5　在图 3-15 所示的电路中，已知：U_{S}=100V，R_1=60Ω，R_2=20Ω，R_3=20Ω，C=0.2F，开关 S 闭合前，电路已处于稳定状态，t=0 时，开关 S 闭合，试求 $t\geqslant 0$ 时的 u_{C} 和 i_{C}。

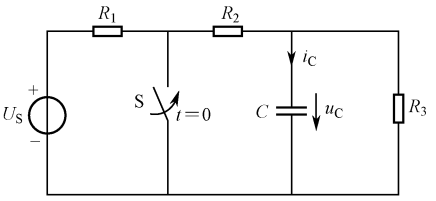


图 3-15　例 3.5 图

解　（1）求初始值

因开关闭合前，电路已稳定，所以电容相当于开路，电容电压初始值为：

$$u_{\mathrm{C}}(0_+)=u_{\mathrm{C}}(0_-)=\frac{R_3}{R_1+R_2+R_3}U_{\mathrm{S}}=\frac{20}{60+20+20}\times 100=20(\mathrm{V})$$

（2）求稳态值

换路后，电路无外激励，所以 $u_{\mathrm{C}}(\infty)$=0。

（3）求时间常数 τ

在 $t\geqslant 0$ 的电路中，R_2 和 R_3 并联，其等效电阻为：$R=\dfrac{R_2R_3}{R_2+R_3}=\dfrac{20\times 20}{20+20}=10(\Omega)$

则时间常数为：$\tau=RC=10\times 0.2=2$（s）

（4）RC 电路的零输入响应为：

$$u_C = 20e^{-\frac{t}{2}}\ (V)，\ t \geqslant 0$$

$$i = C\frac{du_C}{dt} = -2e^{-\frac{t}{2}}(A)，\ t \geqslant 0$$

2. RL 串联电路的零输入响应

RL 电路的零输入响应是电路电感的初始储能激励而引起的响应。图 3-16 中开关 S 在断开位置，电感 L 中的稳态电流 I_0 为其初始电流，即

$$i(0_-) = I_0 = \frac{U_S}{R_1 + R_2}$$

在 t=0 时，闭合开关 S，电路在电感初始储能的激励下，产生电流、电压的暂态过程，直到储存的全部磁场能量被电阻耗尽，电流、电压才等于零。

用三要素法分析一阶 RL 电路的零输入响应。

由于换路后无输入激励，所以 $i_L(\infty)=0$，又因 $i_L(0_-)=I_0$，$i_L(0_+)=i_L(0_-)=I_0$，$\tau=L/R_2$，由式（3.13）得

$$i_L = \frac{U_S}{R_1 + R_2}e^{-\frac{R_2}{L}t} = I_0 e^{-\frac{R_2}{L}t} \tag{3.19}$$

$$u_{R_2} = R_2 i_L = \frac{R_2 U_S}{R_1 + R_2}e^{-\frac{R_2}{L}t} \tag{3.20}$$

$$u_L = L\frac{di}{dt} = -\frac{R_2 U_S}{R_1 + R_2}e^{-\frac{R_2}{L}t} \tag{3.21}$$

i、u_{R2}、u_L 随时间变化的曲线如图 3-17 所示，电压、电流变化规律也是按指数规律变化的。同样，$\tau=L/R_2$ 反映了过渡过程进行的快慢。τ越大，电感电流变化越慢，反之越快。t=0_时，$i_L=I_0$，$u_{R2}=I_0R_2$，$u_L=0$；t=0+时，$i_L=I_0$，$u_{R2}=I_0R_2$，$u_L=-I_0R_2$。即换路时，i_L、u_{R2} 没有发生跃变，u_L 发生了跃变。

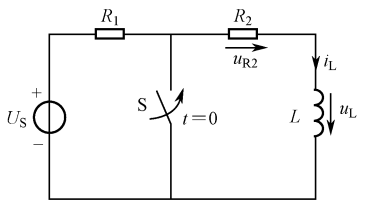


图 3-16　一阶 RL 电路的零输入响应

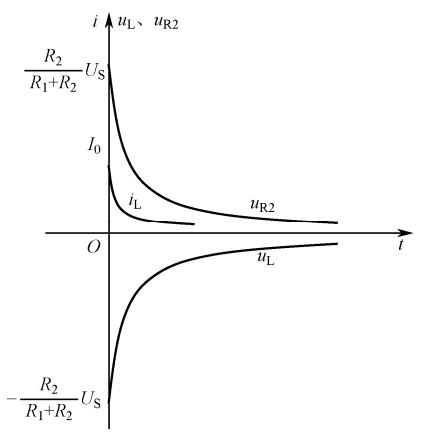


图 3-17　一阶 RL 电路零输入响应波形

由以上分析可知：一阶电路的零输入响应都是按指数规律随时间变化而衰减到零的，这反映了在没有电源作用的情况下，动态元件的初始储能逐渐被电阻耗掉的物理过程。电容电

压或电感电流从一定值减小到零的全过程就是电路的过渡过程；零输入响应取决于电路的初始状态和电路的时间常数。

3.2.3　一阶电路的全响应

当一个非零初始状态的一阶电路受到激励时，电路中所产生的响应称为一阶电路的全响应。

1. RC 串联电路的全响应

图 3-18 所示的电路在 $t=0_-$ 时，储能元件已有储能，即图中换路前终了瞬间 $u_C(0_-)=U_0$。如果在 $t=0$ 时，闭合开关 S，接入电源电压 U_S，电路的响应就是全响应。一阶电路的全响应用“三要素法”求解。

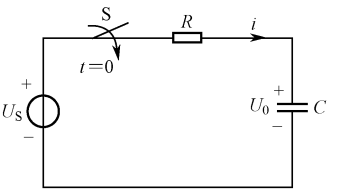


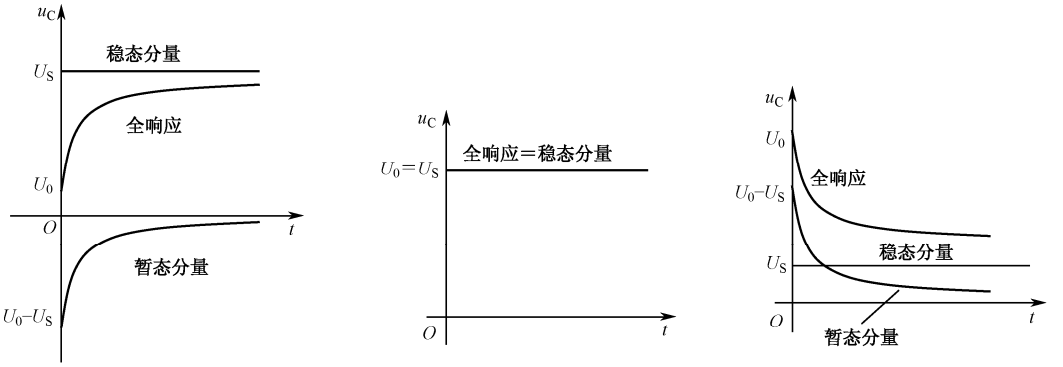
图 3-18　一阶 RC 电路的全响应电路

由于 $u_C(0_+)=u_C(0_-)=U_0$，$u_C(\infty)=U_S$，$\tau=RC$

则

$$u_C(t)=U_S+(U_0-U_S)e^{-\frac{1}{RC}t} \qquad (3.22)$$

由式（3.22）可见，U_S 为电路的稳态分量，$(U_0-U_S)e^{-\frac{1}{RC}t}$ 为电路的暂态分量，即：全响应=稳态分量＋暂态分量。u_C 随时间的变化规律如图 3-19 所示。



（a）$U_0<U_S$时　　（b）$U_0=U_S$时　　（c）$U_0>U_S$时

图 3-19　一阶 *RC* 电路全响应曲线

电路中的电流为：

$$i=C\frac{du_C}{dt}=\frac{U_S-U_0}{R}e^{-\frac{t}{RC}} \qquad (3.23)$$

可见，电路中电流 i 只有暂态分量，而稳态分量为零。

也可以将式（3.22）改写为：

$$u_C(t)=U_S\left(1-e^{-\frac{1}{RC}t}\right)+U_0e^{-\frac{1}{RC}t} \qquad (3.24)$$

式中，$U_S\left(1-e^{-\frac{1}{RC}t}\right)$ 为电容初始值电压为零时的零状态响应；$U_0e^{-\frac{1}{RC}t}$ 为电容初始值电压为 U_0

时的零输入响应。所以，全响应=零状态响应＋零输入响应。

同样，将电路中电流 $i=C\dfrac{\mathrm{d}u_\mathrm{C}}{\mathrm{d}t}=\dfrac{U_\mathrm{S}-U_0}{R}\mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}}$ 改写为：

$$i=\frac{U_\mathrm{S}}{R}\mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}}+\frac{-U_0}{R}\mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}} \tag{3.25}$$

式中，$\dfrac{U_\mathrm{S}}{R}\mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}}$ 为电路电流的零状态响应，$-\dfrac{U_0}{R}\mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}}$ 为电路中电流的零输入响应，式中负号表示电流方向与图中参考方向相反。



应用举例 —— 练一练

例 3.6 在图 3-20 所示的电路中，已知：R_1=3kΩ，R_2=6kΩ，C=5μF，U_1=3V，U_2=9V。开关 S 长期合在位置 1，在 t=0 时，把开关换接到位置 2，试求：$t\geqslant 0$ 时电容器上的电压 u_C。

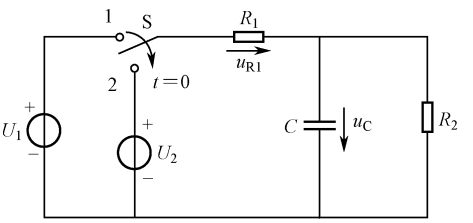


图 3-20 例 3.6 图

解 （1）求初始值

在 t=0_时：

$$u_\mathrm{C}(0_-)=\frac{R_2}{R_1+R_2}U_1=\frac{6}{3+6}\times 3=2(\mathrm{V})$$

根据换路定律：u_C（0+）＝u_C（0_）=2(V)

（2）求稳态值

开关 S 换接到位置 2 后，电容器继续充电，当 t=∞时，充电结束。

$$u_\mathrm{C}(\infty)=\frac{R_2}{R_1+R_2}U_2=\frac{6}{3+6}\times 9=6(\mathrm{V})$$

（3）求时间常数

$$R=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}=\frac{3\times 6}{3+6}=2(\mathrm{k\Omega})$$

$$\tau=RC=2\times 10^3\times 5\times 10^{-6}=0.01(\mathrm{s})$$

（4）电容器电压 u_C 的全响应为：

$$u_\mathrm{C}(t)=6+(2-6)e^{-t/0.01}=6-4e^{-100t}(\mathrm{V})$$

2. RL 串联电路的全响应

在图 3-21 中，电感 L 原已有初始储能，即 t=0_时，i（0_）=I_0。在 t=0 时，闭合开关 S，可根据三要素法确定 $t\geqslant 0$ 时电路的全响应 i 及 u_L。

由于 $i(0_+)=i(0_-)=I_0$，$i(\infty)=U/R$，$\tau=L/R$，所以由式（3.12）可得全响应为：

$$i=\frac{U}{R}+(I_0-\frac{U}{R})\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}=\frac{U}{R}+(I_0-\frac{U}{R})\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t}$$

$$u_\mathrm{L}=L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}=-(I_0R-U)\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}=-(I_0R-U)\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t}$$

RL 串联电路的全响应的电流响应 i 随时间变化曲线如图 3-22 所示。其中稳态响应分量 $i'=\dfrac{U}{R}$，暂态响应分量：$i''=(I_0-U/R)\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}$。

如果认为在图 3-21 的电路中，电感的初始电流 I_0 是由于前一次换路积蓄的，那么 $I_0<U/R$，因此，t=0 时，(I_0-U/R) 为负值。

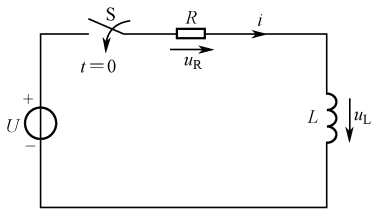


图 3-21　一阶 RL 电路的全响应

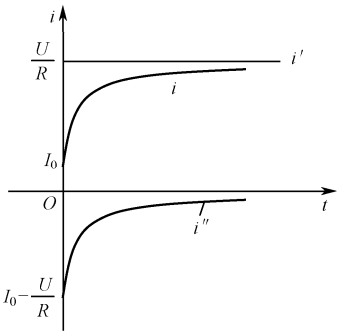


图 3-22　一阶 RL 电路电流全响应的曲线



应用举例 —— 练一练

例 3.7　在图 3-23 所示的电路中，已知：U_S=100 V，R_0=150Ω，R=50Ω，L=2H，在开关 S 闭合前电路已处于稳态。t=0 时将开关 S 闭合，求开关闭合后电流 i_L 的变化规律。

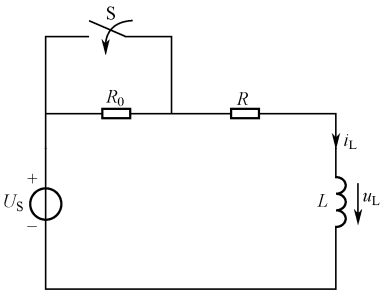


图 3-23　例 3.7 图

解　（1）求初始值

在 t=0_时：$i(0_-)=I_0=\dfrac{U_S}{R_0+R}=\dfrac{100}{150+50}=0.5(\mathrm{A})$

根据换路定律：$i(0_+)=i(0_-)=0.5(\mathrm{A})$

（2）求稳态值

开关 S 闭合后，R_0 被短路，当 $t=\infty$ 时：

$$i(\infty)=\frac{U_S}{R}=\frac{100}{50}=2(\mathrm{A})$$

（3）求时间常数

$$\tau=\frac{L}{R}=\frac{2}{50}=0.04(\mathrm{s})$$

则开关闭合后电流 i_L 的全响应为：

$$i_L=2+(0.5-2)\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}=2-1.5\mathrm{e}^{-\frac{t}{0.04}}=2-1.5\mathrm{e}^{-25t}\ (\mathrm{A})\qquad (t\geqslant 0)$$



实践操作 —— 做一做

连接如图 3-24 所示电路。

（1）电容器的充电过程观测

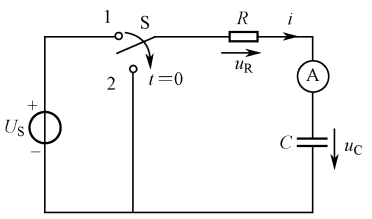


图 3-24　实验电路图

图中 U_S=12V，R=100kΩ，C=1000μF（25V），在电路中串联一个 12V/2W 的小灯泡。

① 在 t=0 时，将开关 S 合于 1 的位置，用电压表检测电阻和电容器两端的电压，观察灵敏检流计中电流、电阻两端电压和电容器两端电压表的变化情况，用示波器观察电阻两端电压和电容器两端电压波形，将观察结果记入表 3-3 中。电流表中的电流由大到小变化，最后近似为零；电阻两端电压由大到小，最后近似为零；电容器两端的电压由小到大，最后近似为 12V；表明电容器充电结束。

表 3-3　电容器的充电过程测试结果

测 试 项 目		t=0+	t=∞
灵敏电流计	指针有无偏转		
	指针偏转的方向		
	最后指针的位置		
电压表	电阻两端的电压		
	电容两端的电压		
灯泡	亮度		
示波器	电阻两端电压的波形		
	电容两端电压波形		

② 在电容保持不变的情况下，改变电阻的值（增大或减小电阻 R），观察灯泡亮度的时间，填写表 3-4。

③ 在电阻保持不变的情况下，改变电容的值（增大或减小电容 C），观察灯泡亮度的时间，填写表 3-4。

表 3-4　时间常数测试结果

项　目	数　值	灯泡亮度时间	时间常数
电容（C=1000μF）不变，改变电阻	R=100kΩ		
	R=200kΩ		
	R=300kΩ		
电阻（R=100kΩ）不变，改变电容	C=470μF		
	C=1000μF		
	C=2000μF		

注：灯泡亮度时间用最长、最短或介于两者之间表示。

（2）电容器的放电过程观测

当开关 S 合于 1 的位置稳定后再扳到 2 的位置，电容器 C 放电。

① 观察灵敏电流计中电流、电阻两端电压和电容器两端电压表的变化情况，用示波器观察电阻两端电压和电容器两端电压波形，将观察结果记入表 3-5 中。

② 增大或减小电阻 R、电容 C，重复上面的步骤。

表 3-5　电容器的放电过程测试结果

测 试 项 目		$t=0_+$	$t=\infty$
灵敏电流计	指针有无偏转		
	指针偏转的方向		
	最后指针的位置		
电压表	电阻两端的电压		
	电容两端的电压		
灯泡	亮度		
示波器	电阻两端电压的波形		
	电容两端电压波形		



问题研讨 —— 想一想

（1）电容器在充电、放电过程中，增大、减小电阻或增大、减小电容，灯泡从亮到暗的时间有何变化？试说明充电时间长短与什么有关？

（2）动态电路的过渡过程理论上讲要经过无限长的时间，但实际上一般认为 $t=$_____时间后过渡过程就结束了。时间常数越大，过渡过程越_____。

（3）暂态过程中，电路中的电流和电压是按照_____规律变化的。

A．对数　　B．指数　　C．正弦　　D．余弦

（4）动态电路工作的全过程是_____。

A．前稳态—过渡过程—换路—后稳态　　B．前稳态—换路—过渡过程—后稳态

C．换路—前稳态—过渡过程—后稳态　　D．换路—过渡过程—前稳态—后稳态

项目小结

由于电路中存在储能元件，当电路发生换路时会出现过渡过程。本项目主要介绍了线性电路的过渡过程的基本概念和一阶动态电路的分析方法。

1. 过渡过程含有动态元件的电路称为动态电路，电路中只有一个动态元件的电路称为一阶动态电路。动态的暂态过程是电路从一个稳态变化到另一个稳态的过程。如果在这个过程中，动态元件的初始状态为零，则称为零状态响应。如果动态元件的初始状态不为零，而暂态过程中没有电源加入，则称为零输入响应。如果在这个过程中动态元件的初始状态不为零，又有电源加入，则称全响应。

2. 换路定律

分析暂态过程的依据之一是换路定律，即电路在换路瞬间，电容元件的电压不能跃变，电感元件的电流不能跃变。换路定律的数学表达式为：

$$\left.\begin{aligned} u_{\mathrm{C}}(0_+)&=u_{\mathrm{C}}(0_-)\\ i_{\mathrm{L}}(0_+)&=i_{\mathrm{L}}(0_-)\end{aligned}\right\}$$

换路瞬间电容电流 i_C 和电感电压 u_L 是可以跃变的。

3. 时间常数 τ

过渡过程理论上要经历无限长时间才结束。实际的过渡过程长短可根据电路的时间常数 τ 来估算，一般认为当 $t=(3\sim5)\tau$ 时，电路的过渡过程结束。一阶 RC 电路 $\tau=RC$; 一阶 RL 电路 $\tau=L/R$，τ 的单位为 s。τ 的大小反映了电路参量由初始值变化到稳态值的 63.2%所需的时间。

4. 三要素法

分析一阶动态的方法有经典法和三要素法两种。经典法是根据 KVL 列出换路后的微分方程，然后通过求解微分方法来求解电路未知量的方法。

三要素法是先求出暂态电路的三个要素，即初始值 $f(0_+)$、稳态值 $f(\infty)$和时间常数 τ，然后代入三要素公式：$f(t)=f(\infty)+[\,f(0_+)-f(\infty)]\,e^{-\frac{t}{\tau}}$ 来求解暂态量的方法。三要素法简单易算，是读者重点要掌握的方法。

习　　题

3.1　在图 3-25 所示的电路中，已知：U_S=10V，R_1=6Ω，R_2=4Ω，L=2mH，开关 S 原处于断开状态。求开关 S 闭合后 $t=0_+$时各电流及电感电压 u_L 的数值。

3.2　在图 3-26 所示的电路中，已知：U_S=12V，R_1=4Ω，R_2=8 Ω，R_3=4Ω，$u_C(0_-)=0$，$i_L(0_-)=0$，当 $t=0$ 时开关 S 闭合。求开关 S 闭合后各支路电流的初始值和电感上电压的初始值。

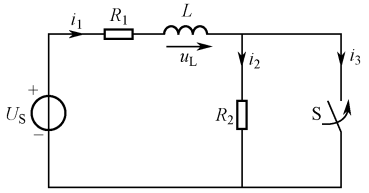


图 3-25

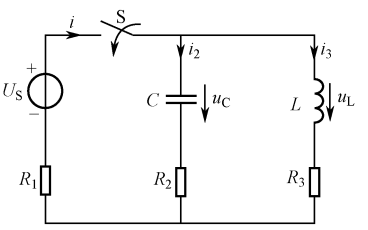


图 3-26

3.3　在图 3-27 所示的电路中，已知：U_S=16 V，R_1=8 kΩ，R_2=16kΩ，C=2μF，开关 S 原来处于断开状态，电容上电压 $u_C(0_-)=0$。求开关 S 闭合后 $t=0_+$时各电流及电容电压的数值。

3.4　电路图 3-28 所示的电路，已知：U_S=200V，R=40Ω，零初始状态，t=0 时闭合开关 S，开关 S 闭合后 1.5ms 时电流为 0.25mA。求：（1）充电的时间常数；（2）电容器的电容量；（3）充电电流的初始值；（4）充电过程中的电容电压。

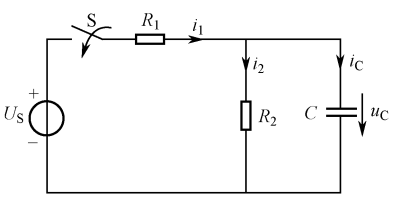


图 3-27

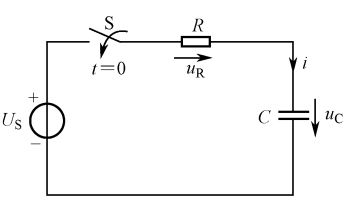


图 3-28

3.5　电路图 3-29 图所示，已知：U_S=12V，R_1=R_2=R_3=R_4=2Ω，C=300μF，I_S=2A，且 t=0₋时，u_C=0。试求开关 S 闭合后 u_C 的变化规律。

3.6　电路如图 3-30 所示，已知：U_S=200V，R=20Ω，L=20H。（1）求当 S 闭合后，电流的变化规律和达到稳态值所需的时间；（2）如果将电源电压提高 250V，求电流达到额定值的时间。

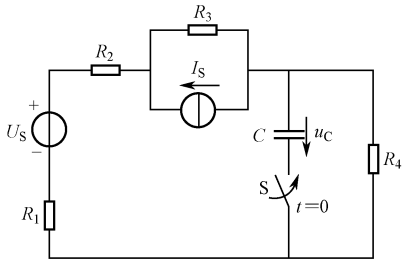


图 3-29

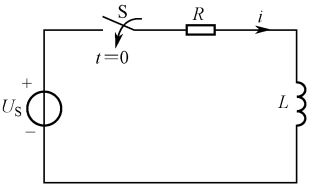


图 3-30

3.7　在 RC 串联电路中，R=1 kΩ，C=10 μF，u_C(0₋)=0，接在电压为 100 V 的直流电源上充电，试求充电 15ms 时电容上的电压和电流。

3.8　电路如图 3-31 所示，已知：U_S=120 V，R_1=3kΩ，R_2=6 kΩ，R_3=3 kΩ，C=10μF，u_C(0₋)=0，求：S 闭合后 u_C 和 i 的变化规律。

3.9　电路如图 3-32 所示，已知：U_S=12V，R_1=10Ω，R_2=20Ω，R_3=10Ω，L=0.5H，开关闭合前电路处于稳态，t=0 时开关 S 闭合。试求：电感上电流和电压的变化规律。

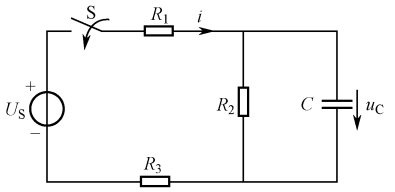


图 3-31

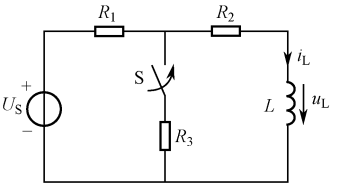


图 3-32

3.10　电路如图 3-33 所示，已知：U_S=10V，R_1=20Ω，R_2=40Ω，R_2=20Ω，C=0.2F，换路前电路处于稳态，求：换路后的 i_C 和 u_C。

3.11　电路如图 3-34 所示，　已知 R_1=100Ω，R_2=400Ω，C=125μF，US=200V，在换路前电容上有电压 u_C(0₋)=50 V。求 S 闭合后电容电压和电流的变化规律。

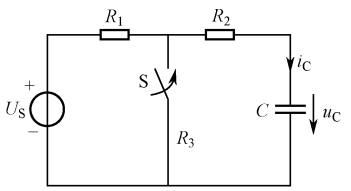


图 3-33

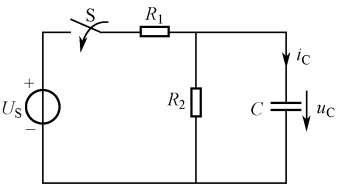


图 3-34

3.12　电路如图 3-35 所示，已知：U_{S1}=U_{S2}=3V，R_1=1Ω，R_2=1Ω，R_3=2Ω，L=3H，t≥0 时开关由 a 拨向 b，试求：i_L 和 i_1 的表达式，并绘出波形图（假定换路前电路已处于稳态）。

3.13 电路如图 3-36 所示，已知：U_{S1}=12，U_{S2}=9V，R_1=6Ω，R_2=3Ω，L=1 H。试用三要素法求 $t\geqslant 0$ 时的 i_1、i_2 和 i_L。

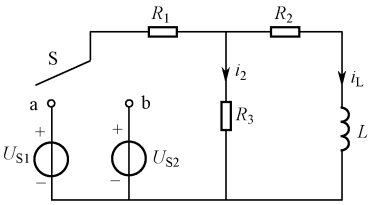


图 3-35

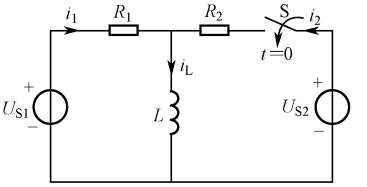


图 3-36

项目 4　非正弦周期电流电路的分析与测试



1. 非正弦周期电量的产生及分解；
2. 非正弦周期电量的有效值、平均值和功率的计算；
3. 非正弦周期电流电路的分析与测试。



1. 了解非正弦周期电量产生的原因及分解方法；
2. 掌握非正弦周期电量的有效值、平均值和功率的计算；
3. 掌握分析线性非正弦周期电流电路的方法步骤。



1. 会分析正弦周期电流电路；
2. 会使用示波器、低频信号发生器测试非正弦周期电流电路。



1. 通过“由特殊到一般，由简单到复杂，知识不断积累”的学习过程，逐步培养学生勤观察、勤思考、好动手的学习与工作习惯，并具有分析问题和解决问题的能力；

2. 逐步提高学生的专业意识、培养他们的高度责任心，规范操作，使学生养成良好的科学态度和求是精神；

3. 锻炼信息、资料搜集与查找的能力。

任务 4.1　非正弦周期电流电路的认识与测试



项目 2 中已经研究了正弦电流电路的性质和分析方法，在实际工程中，还会经常遇到电

流、电压不按正弦规律变化的非正弦电流电路，如整流电路中的全波整流波形、数字电路中的方波、扫描电路中的锯齿波等都是常见的非正弦周期波电流。

电路中的电压、电流不按正弦规律变化，但还是按照周期性变化的电路称为非正弦周期性电路。在工程技术和电子技术中，经常需要处理这类电流、电压的问题，本任务学习非正弦周期电量的产生、分解及非正弦周期电流电路中的有效值、平均值和功率的计算。

任务目标

了解非正弦周期电量的概念、产生和分解方法，掌握非正弦周期电流电路中的有效值、平均值和功率的计算。能在 Multisim9 环境下创建非正弦周期电路，并进行仿真。

任务实施

现象观察 —— 看一看

图 4-1 为用二极管构成的单相半波整流电路，图中 u 为 12V50Hz 的正弦交流电压，二极管 VD 选用 IN4001，负载 R_L 为 1kΩ，1/4W 的电阻。试用双踪示波器观察 u_2、u_L 的波形，比较它们有什么不同。

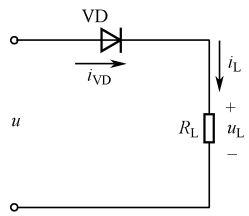
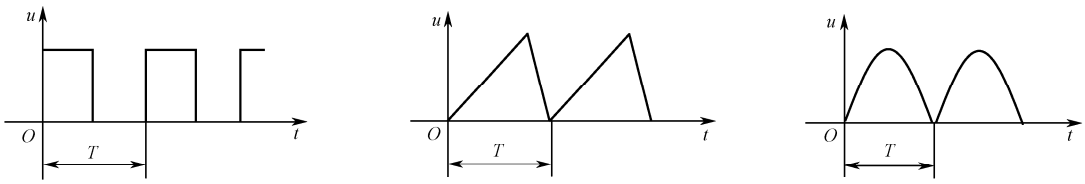


图 4-1　半波整流电路

4.1.1　非正弦周期电量的产生及分解

1. 非正弦周期电量的特点

实际工程中不完全是正弦电路，经常会遇到非正弦周期电流电路。在电子技术、自动控制、计算机和无线电技术等方面，电压和电流往往都是周期性的非正弦波形，如图 4-2 所示。从图可以看出这类非正弦周期信号的波形的特点是：不是正弦波；按周期性规律变化，即满足 $f(t)=f(kT+t)$（式中 k=0，1，2，…；T 为周期）。



（a）方波　　（b）锯齿波　　（c）全波整流波形

图 4-2　几种常见的非正弦波

2. 产生非正弦信号的原因

（1）当电路中所加的电源为非正弦周期量时，即使电路为线性电路，由于电源电压本身是一个非正弦周期量，那么这个电源在电路中所产生的电流也将是非正弦周期电流。

一般地说，交流发电机所产生的电压波形，虽然力求使电压按正弦规律变化，但由于制造方面的原因，其电压波形与正弦波相比总有一些畸变。有些信号源，本身产生的就是非正弦电压，如脉冲信号发生器产生的矩形脉冲电压信号、示波器中的锯齿波电压信号等。

（2）当一个电路有几个不同频率的正弦电源（包括直流）同时作用时，电路中的电流也不会是正弦的。例如晶体管交流放大电路就属于这种情况，其中直流电源提供的是直流电压，而输入信号为正弦电压，则电路中的电流既不是直流也不是正弦交流，而是非正弦周期电流。

（3）如果电路中含有非线性元件，即使电源是正弦的，其响应也可能是非正弦周期函数。如图 4-1 所示的二极管半波整流电路中，利用二极管的单向导电性，电流只能在一个方向通过，另一个方向被阻断，所以输出为非正弦周期波。

所以，非正弦周期量的主要产生来源有：实际的交流发电机发出的电压波形；收音机、电视机收到的信号电压或电流；应用于自动控制、计算机等技术领域的脉冲信号；实验室的信号发生器产生非正弦信号；电子技术中的非线性元件的作用；非电量电子测量技术中的非正弦信号；各种语音、图像信号等。

3. 非正弦周期量的分解

在研究讨论非正弦周期电流电路时，为了便于利用直流电路和正弦稳态电路的分析方法去分析非正弦周期电路，很有必要对非正弦周期信号进行分解，即周期函数分解为傅里叶级数。

设 $f(t)$是周期为 T 的任意函数，即 $f(t)=f(kT+t)$，若给定的 $f(t)$满足狄里赫利条件（周期函数在有限的区间内，只有有限个第一类间断点和有限个极大值、极小值）时，该函数就可以分解为傅里叶级数，电工技术中常用的非周期性函数都满足狄里赫利条件。对于这样非正弦周期函数可分解为如下的傅里叶级数：

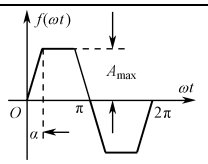
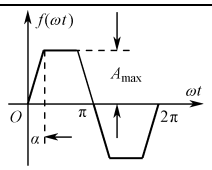
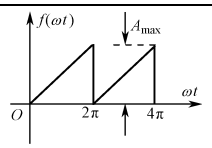
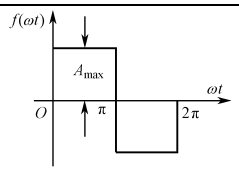
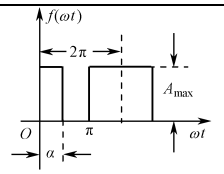
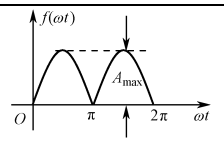
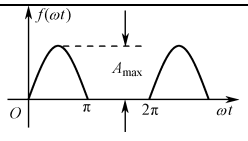
$$\begin{aligned} f(t)&=A_0+A_1\sin(\omega t+\varphi_1)+A_{1\mathrm{m}}\sin(\omega t+\varphi_1)+A_{2\mathrm{m}}\sin(2\omega t+\varphi_2)+\cdots+A_{\mathrm{km}}\sin(k\omega t+\varphi_{\mathrm{k}}) \\ &=A_0+\sum_{k=1}^{\infty}A_{\mathrm{km}}\sin(k\omega t+\varphi_{\mathrm{k}}) \end{aligned} \tag{4.1}$$

式中，A_0 是不随时间变化的常数，称为 $f(t)$的直流分量或恒定分量；k=1 项表达式 $A_{1\mathrm{m}}\sin(\omega t+\varphi_1)$称为 $f(t)$的基波分量，其频率与 $f(t)$的频率相同；$k\geqslant 2$ 各项统称为谐波分量，如 $A_{2\mathrm{m}}\sin(2\omega t+\varphi_2)$称为 $f(t)$的二次谐波分量等；k 为奇数的分量称为奇次谐波，k 为偶数的分量称为偶次谐波。

将周期函数 $f(t)$分解为直流分量、基波分量及各次谐波分量之和，称为谐波分析。可利用有关公式进行计算，但工程上更多利用的是查表法。表 4-1 列出了电工技术中常遇到的几种常见的典型周期函数的傅里叶级数展开式，可供进行谐波分析时引用。

傅里叶级数是一个无穷级数，从理论上讲仅当取无限多项时，它才准确地等于原有的周期函数。而在实际应用时，由于其收敛很快，较高次谐波的振幅很小，因此只需取级数的前几项进行计算就足够准确了。

表 4-1　典型周期函数的傅里叶级数展开式

波　形	傅里叶级数
	$f(\omega t)=\dfrac{8A_{\max}}{\pi^2}\left(\sin\omega t-\dfrac{1}{9}\sin 3\omega t+\dfrac{1}{25}\sin 5\omega t-\cdots+\dfrac{(-1)^{k-1}}{k^2}\sin k\omega t+\cdots\right)$ （k=1，3，5，…）
	$f(\omega t)=\dfrac{4A_{\max}}{\alpha\pi}\left(\sin\alpha\sin\omega t+\dfrac{1}{9}\sin 3\alpha\sin 3\omega t+\dfrac{1}{25}\sin 5\alpha\sin 5\omega t+\cdots+\dfrac{1}{k^2}\sin k\alpha\sin k\omega t+\cdots\right)$ （k=1，3，5，…）
	$f(\omega t)=\dfrac{A_{\max}}{2}-\dfrac{A_{\max}}{\pi}\left(\sin\omega t+\dfrac{1}{2}\sin 2\omega t+\dfrac{1}{3}\sin 3\omega t+\cdots+\dfrac{1}{k}\sin k\omega t+\cdots\right)$ （k=1，2，3，…）
	$f(\omega t)=\dfrac{4A_{\max}}{\pi}\left(\sin\omega t+\dfrac{1}{3}\sin 3\omega t+\dfrac{1}{5}\sin 5\omega t+\cdots+\dfrac{1}{k}\sin k\omega t+\cdots\right)$ （k=1，3，5，…）
	$f(\omega t)=A_{\max}\alpha+\dfrac{2A_{\max}}{\pi}\left(\sin\alpha\pi\cos\omega t+\dfrac{1}{2}\sin 2\alpha\pi\cos 2\omega t+\cdots+\dfrac{1}{k}\sin k\alpha\pi\cos k\omega t+\cdots\right)$ （k=1，2，3，…）
	$f(\omega t)=\dfrac{4A_{\max}}{\pi}\left(\dfrac{1}{2}+\dfrac{1}{1\times 3}\cos 2\omega t-\dfrac{1}{3\times 5}\cos 4\omega t+\dfrac{1}{5\times 7}\cos 6\omega t+\cdots\right)$
	$f(\omega t)=\dfrac{2A_{\max}}{\pi}\left(\dfrac{1}{2}+\dfrac{\pi}{4}\cos\omega t+\dfrac{1}{1\times 3}\cos 2\omega t-\dfrac{1}{3\times 5}\cos 4\omega t+\dfrac{1}{5\times 7}\cos 6\omega t\cdots\right)$

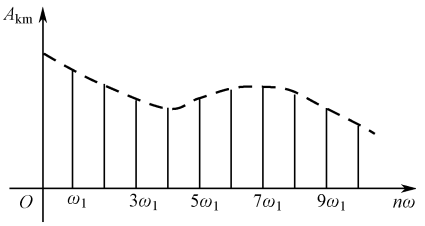


图 4-3　幅度频谱

4. *f*(*t*)的频谱（线频谱）

工程中为了清晰地表示一个非正弦周期量所含各次谐波分量的大小和相位，通常采用频谱图的方法。所谓频谱图，就是用长度与各次谐波振幅大小或相位大小成比例的线段，按照谐波频率的次序排列起来的图形。这种方法可以很直观地将各次谐波振幅、相位与频率的关系表示出来。非正弦周期函数的频谱是离散的。图 4-3 所示为幅度频谱。

4.1.2　非正弦周期电流电路中的有效值、平均值和功率

1. 非正弦周电量的有效值

在实际工作中，往往需要对一个非正弦周期量有一个总体的度量。正弦量的有效值可以计算和测量；非正弦量的有效值也可以计算和测量。

任何周期量的有效值都可以按照方均根值进行计算。如果已知周期量的解析式，可以直接求它的方均根值，即

$$A=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T[f(t)]^2\,\mathrm{d}t} \tag{4.2}$$

对于非正弦电流 i，它的有效值 I 定义为：

$$I=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2\mathrm{d}t} \tag{4.3}$$

如果一个非正弦周期电流已经展开为傅里叶级数，则可以通过各次谐波的有效值来计算非正弦周期电量的有效值。

设非正弦周期电流 i 的傅里叶级数为 $i=I_0+\sum_{k=1}^{\infty}I_{\mathrm{km}}\sin(k\omega t+\varphi_{\mathrm{k}})$，其中，$I_0$ 是直流分量，I_{km} 为 k 次谐波的最大值。将 $i=I_0+\sum_{k=1}^{\infty}I_{\mathrm{km}}\sin(k\omega t+\varphi_{\mathrm{k}})$ 代入式（4.3）中，可求得：

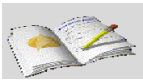
$$I=\sqrt{I_0^{\,2}+I_1^{\,2}+I_2^{\,2}+\cdots}=\sqrt{I_0^2+\sum_{k=1}^{\infty}I_{\mathrm{k}}^2} \tag{4.4}$$

式中，$I_{\mathrm{k}}=\dfrac{I_{\mathrm{km}}}{\sqrt{2}}$ 为 k 次谐波分量的有效值。式（4.4）说明非正弦周期电流的有效值等于恒定分量（直流分量）及各谐波分量有效值的平方和的平方根。此结论可推广应用于其他非正弦周期量，如电压有效值的计算为：

$$U=\sqrt{U_0^{\,2}+U_1^{\,2}+U_2^{\,2}+\cdots}=\sqrt{U_0^2+\sum_{k=1}^{\infty}U_{\mathrm{k}}^2} \tag{4.5}$$

注意：零次谐波的有效值为恒定分量的值，其他各次谐波有效值与最大值的关系为：

$$I_{\mathrm{k}}=I_{\mathrm{km}}/\sqrt{2}\,,\quad U_{\mathrm{k}}=U_{\mathrm{km}}/\sqrt{2}$$



应用举例 —— 练一练

例 4.1　设周期电流 i（t）的傅里叶级数为 $i(t)=\dfrac{\pi}{4}+\sin\left(\omega t+\dfrac{\pi}{2}\right)+\dfrac{1}{3}\sin\left(3\omega t-\dfrac{\pi}{2}\right)+\dfrac{1}{5}\sin\left(5\omega t+\dfrac{\pi}{2}\right)+\dfrac{1}{7}\sin\left(7\omega t-\dfrac{\pi}{2}\right)+\cdots$，试计算电流 i（t）的有效值（高次谐波取到 7 次谐波为止）。

解　电流 i（t）的有效值为：

$$I=\sqrt{I_0^2+\sum_{k=1}^{\infty}I_k^2}=\sqrt{I_0^2+\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{\infty}I_{km}^2}=\sqrt{\left(\frac{\pi}{4}\right)^2+\frac{1}{2}\left[1^2+\left(\frac{1}{3}\right)^2+\left(\frac{1}{5}\right)^2+\left(\frac{1}{7}\right)^2\right]}=1.097\ \text{（A）}$$

例 4.2 已知电压的波形如图 4-4 所示，其中 U_m=100V，求该电压的有效值。

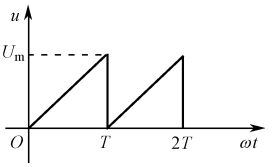


图 4-4 例 4.2 图

解 由波形图得非正弦电压的解析式为：

$$u(t)=\frac{U_m}{T}t=\frac{100}{T}t\text{，（0<}t\text{<T）}$$

方法一：直接代入定义式（4.2）中求得：

$$U=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2\mathrm{d}t}=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T\left(\frac{100}{T}t\right)^2\mathrm{d}t}=57.7(\text{V})$$

方法二：将非正弦电压展开成傅里叶级数，查表 4-1 得：

$$u(t)=\frac{U_m}{2}-\frac{U_m}{\pi}\left(\sin\omega t+\frac{1}{2}\sin 2\omega t+\frac{1}{3}\sin 3\omega t+\cdots\right)$$

$$=\frac{100}{2}-\frac{100}{\pi}\left(\sin\omega t+\frac{1}{2}\sin 2\omega t+\frac{1}{3}\sin 3\omega t+\cdots\right)$$

$$U=\sqrt{U_0{}^2+U_1{}^2+U_2{}^2+\cdots}$$

$$=\sqrt{50^2+\left(\frac{100}{\pi}\right)^2\times\frac{1}{2}\times\left[1^2+\left(\frac{1}{2}\right)^2+\left(\frac{1}{3}\right)^2+\left(\frac{1}{4}\right)^2+\cdots\right]}=57.1(\text{V})$$

2. 非正弦周期电量的平均值

除有效值外，非正弦周期电量有时还引用平均值。对于非正弦周期电量的傅里叶级数展开式中直流分量为零的交流分量，平均值为零。但为了便于测量和分析，一般定义周期量的平均值为它的绝对值的平均值。

设周期电流为 i（t），则其平均值为：

$$I_{av}=\frac{1}{T}\int_0^T\left|i(t)\right|\mathrm{d}t \qquad (4.6)$$

即非正弦周期量的平均值等于其绝对值在一个周期内的平均值。

应注意：一个周期内其值有正、有负的周期量的平均值 I_{av} 与其直流分量 I 是不同的，只有一个周期内其值为正值的周期电量，平均值才等于其直流分量。

例如，当 i（t）=$I_m\sin\omega t$ 时，其平均值为：

$$I_{av}=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\left|I_m\sin\omega t\right|\mathrm{d}\omega t=\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}I_m\sin\omega t\mathrm{d}\omega t=\frac{2I_m}{\pi}=0.637I_m=0.898I$$

或 I=1.11I_{av}。

同理，周期电压的平均值为：

$$U_{av}=\frac{1}{T}\int_0^T\left|u(t)\right|\mathrm{d}t$$

对于同一个非正弦周期电流，若用不同类型的仪表进行测量，就会得出不同的结果。如

用直流仪表测量，所测结果是直流分量；用电磁式或电动式仪表测量，所测结果为有效值；用整流磁电式仪表测量，所测结果为平均值。因此，在测量非正弦周期量时，要注意选择合适的仪表，并且注意各种不同类型仪表读数的含义。

3. 非正弦周期电理的功率

（1）平均功率

非正弦周期电路的平均功率可定义为：

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T p(t)\mathrm{d}t \tag{4.7}$$

设某二端网络端口电压 u（t）、电流 i（t）分别为：

$$u(t)=U_0+\sum_{k=1}^{\infty}U_{\mathrm{km}}\sin(k\omega t+\varphi_{\mathrm{uk}})$$

$$i(t)=I_0+\sum_{k=1}^{\infty}I_{\mathrm{km}}\sin(k\omega t+\varphi_{\mathrm{ik}})$$

式中，φ_{uk}、φ_{ik} 为 k 次谐波电压、电流的初相。并设 $\varphi_{\mathrm{k}}=\varphi_{\mathrm{uk}}-\varphi_{\mathrm{ik}}$ 为 k 次谐波电压与 k 次谐波电流的相位差，则

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T p(t)\mathrm{d}t=\frac{1}{T}\int_0^T u(t)i(t)\mathrm{d}t$$

$$=\frac{1}{T}\int_0^T[U_0+\sum_{k=1}^{\infty}U_{\mathrm{km}}\sin(k\omega t+\varphi_{\mathrm{uk}})]\times[I_0+\sum_{k=1}^{\infty}I_{\mathrm{km}}\sin(k\omega t+\varphi_{\mathrm{ik}})]\mathrm{d}t$$

由于

$$P_0=\frac{1}{T}\int_0^T U_0I_0\mathrm{d}t=U_0I_0$$

$$P_{\mathrm{k}}=\frac{1}{T}\int_0^T U_{\mathrm{km}}\sin(k\omega t+\varphi_{\mathrm{uk}})\times I_{\mathrm{km}}\sin(k\omega t+\varphi_{\mathrm{ik}})\mathrm{d}t$$

$$=\frac{1}{2}U_{\mathrm{km}}I_{\mathrm{km}}\cos(\varphi_{\mathrm{uk}}-\varphi_{\mathrm{ik}})\mathrm{d}t=U_{\mathrm{k}}I_{\mathrm{k}}\cos\varphi_{\mathrm{k}}$$

式中，U_{k}、I_{k} 为 k 次谐波电压、电流的有效值。

根据三角函数的正交性，不同次谐波电压、电流的乘积，它们的平均值为零。所以平均功率为：

$$P=P_0+\sum_{k=1}^{\infty}U_{\mathrm{k}}I_{\mathrm{k}}\cos\varphi_{\mathrm{k}} \tag{4.8}$$

式（4.8）表明：非正弦周期电流电路中，不同次谐波电压、电流虽然可以产生瞬时功率，但不能产生平均功率；只有同次谐波电压、电流才能产生平均功率。电路总的平均功率等于直流分量产生的平均功率与各次谐波分量产生的平均功率之和。

（2）无功功率

非正弦电流电路的无功功率定义为各谐波无功功率之和，即

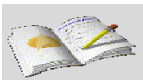
$$Q=\sum_{k=1}^{\infty}U_{\mathrm{k}}I_{\mathrm{k}}\sin\varphi_{\mathrm{k}} \tag{4.9}$$

（3）视在功率

非正弦电流电路的视在功率则定义为：

$$S = UI = \sqrt{U_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k^2} \times \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2} \tag{4.10}$$

应当注意：视在功率不等于各次谐波视在功率之和。



应用举例 —— 练一练

例 4.3 已知某电路的电压、电流分别为：$u(t) = 10 + 20\sin(100\pi t - 30^\circ) + 8\sin(300\pi t - 30^\circ)\text{V}$，$i(t) = 3 + 6\sin(100\pi t + 30^\circ) + 2\sin 500\pi t$ A。求该电路的平均功率、无功功率和视在功率。

解 平均功率为：

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos\varphi_1 = 10 \times 3 + \frac{20}{\sqrt{2}} \times \frac{6}{\sqrt{2}} \cos(-60^\circ) = 60(\text{W})$$

无功功率为：

$$Q = U_1 I_1 \sin\varphi_1 = \frac{20}{\sqrt{2}} \times \frac{6}{\sqrt{2}} \sin(-60^\circ) = -52(\text{var})$$

视在功率为：

$$S = UI = \sqrt{U_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k^2} \times \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2}$$

$$= \sqrt{10^2 + \left(\frac{20}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{8}{\sqrt{2}}\right)^2} \times \sqrt{3^2 + \left(\frac{6}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{2}{\sqrt{2}}\right)^2} = 98.1(\text{V} \cdot \text{A})$$



实践操作 —— 做一做

利用仿真软件 Multisim9 测试非正弦周期电流电路的有效值和平均功率。在 Multisim9 环境下创建图 4-5 所示电路。

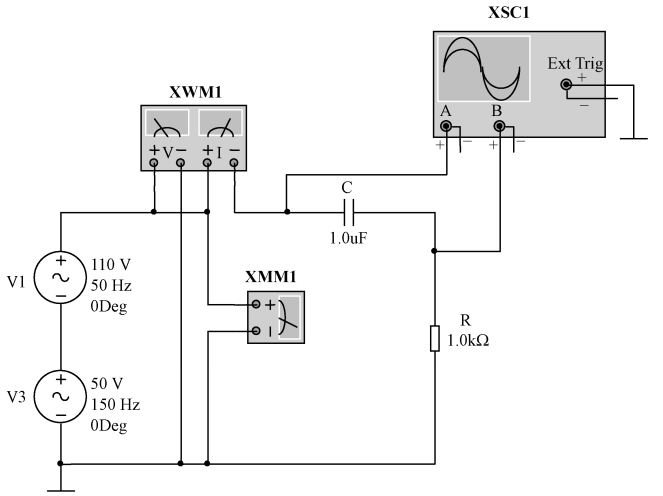


图 4-5 非正弦周期电流电路仿真图

（1）按下“启动/停止”开关，启动仿真分析，等电路稳定后，用电压表和功率表分别测量电路端电压 U 及功率 P，将数据记入表 4-2 中。用示波器观察并记录两个电压源叠加的波形和电阻 R 两端电压的波形（即电流的波形）。

（2）把基波电压源 V1 的电压设为 0，即三次谐波电压源 V3 单独作用，用电压表和功率表分别测量电压和功率的三次谐波分量 U_3、P_3，将测量数据记入表 4-2 中。

（3）将三次谐波电压源 V3 的电压设为 0，即基波电压源 V1 单独作用，用电压表和功率表分别测量电压和功率的基波分量 U_1、P_1，将测量数据记入表 4-2 中。

（4）根据测量数据，验证非正弦周期电流电路的有效值和平均功率的计算公式。

表 4-2　非正弦周期电路的测量

电　压　源	电压（V）	功率（W）
基波 V1 和三次谐波 V3 共同作用时	U=	P=
三次谐波 V3 单独作用时	U_3=	P_3=
基波 V1 单独作用时	U_1=	P_1=



问题研讨 —— 想一想

（1）在一个线性电路中，如果电源电压是非正弦的，那么电路中产生的电流为_____。

（2）一个直流电压 U=5V，和一个正弦电压 u=7sinωtV，则串联叠加合成的电压的表达式为 u=_____。

（3）如测出一个对称方形波的周期 T=5μs，则此方形波的基波频率为_____、三次谐波频率为_____、五次谐波频率为 _____。

（4）正弦电压作用于含有非线性元件的电路时，电路中产生的电流是_____。

（5）下列表达式中，_____属于非正弦电流。

A．$i=7\sin\omega t+3\sin(\omega t+30^{\circ})$ (A)　　B．$i=10\sin\omega t+10\cos\omega t$ (A)

C．$i=5\sin\omega t+\frac{5}{3}\sin 3\omega t$ (A)　　D．$i=10\sin\omega t-5\cos(\omega t+150^{\circ})$ (A)

任务 4.2　非正弦周期电流电路的分析计算与测试



任务描述

一个非正弦周期电压或电流可以分解成傅里叶级数的形式。当一个非正弦周期电压作用于线性电路时，其作用相当于一个直流电压源及一系列不同频率的正弦电压源串联起来，共同作用于电路。因此，可对直流分量和每个谐波分量单独进行分析计算，再运用叠加原理求出总的响应。本任务进行非正弦周期电路的分析计算与测试。

任务目标

理解掌握分析计算非正弦周期电流电路的方法步骤，能分析计算一般的非正弦周期电流电路。能在 Multisim9 环境下创建非正弦周期电路，并进行仿真。

任务实施

知识链接 —— 学一学

1．分析计算的方法步骤

周期性非正弦信号有着各种不同的变化规律，计算这种信号激励下线性电路的响应时，主要利用傅里叶级数将非正弦周期激励信号分解为一系列不同频率的正弦量之和，然后按直流电路和正弦交流电路的计算方法，分别计算在直流和各种频率的正弦信号单独作用下产生的电路响应，再根据线性电路的叠加原理，将所得结果叠加，就可以得到电路中实际的电流和电压，这种方法称为谐波分析法。其分析电路的一般步骤如下。

（1）将给定的非正弦周期激励信号分解为傅里叶级数，并根据计算精度要求，取有限项高次谐波。

（2）分别计算直流分量和各次谐波单独作用下电路的响应，计算方法与直流电路及正弦交流电路的计算方法相同。

（3）应用叠加原理将步骤（2）的结果进行叠加，从而求得所需响应。

2．注意事项

在分析计算非正弦周期电流电路时应注意以下几点：

（1）在直流分量单独作用时，电路相当于直流电路，电容元件相当于开路，电感元件相当于短路。在标明参考方向以后，可以用直流电路的方法求解各电压与电流。

（2）对各次谐波，电路成为正弦交流电路。**应注意：**电感和电容对不同次的谐波激励表现出不同的感抗和容抗，即感抗与谐波频率成正比，容抗与谐波频率成反比。

在基波作用时：$X_{L(1)}=\omega L$，$X_{C(1)}=1/(\omega C)$，在电路标明参考方向后，可用相量法求解电路的响应。

在 k 次谐波作用时，$X_{L(k)}=k\omega L=kX_L$，$X_{C(k)}=1/(k\omega C)=X_{C1}/k$，在电路标明参考方向后，仍可用相量法求解。

（3）注意叠加时，必须先将各次谐波分量响应写成瞬时值表达后才可以叠加，而不能把表示不同频率谐波的正弦量的相量进行加减，因为它们不属于同一频率，这样叠加是没有意义的。最后所求响应的解析式是用时间函数表示的。

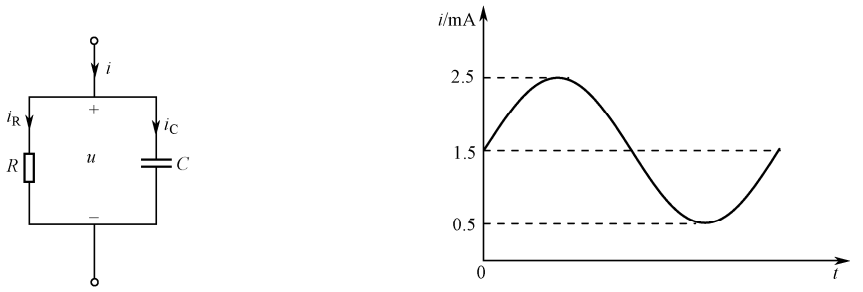
应用举例 —— 练一练

例 4.4　RC 并联电路如图 4-6（a）所示，已知 R=1kΩ，C=50μF，$i=I_0+i_1$=1.5+sin6280t mA，电流波形如图 4-6（b）所示。试求端电压 u 及电容电流 i_C。

解　（1）计算 i 的直流分量 I_0 单独作用时所产生的端电压 U_0：

在 i 的直流分量单独作用时，电容相当于开路，电流 i 中的直流分量 I_0 只能通过电阻，所以

$$U_0 = RI_0 = 1\times10^3\times1.5\times10^{-3} = 1.5(\text{V}) = 1500(\text{mV})$$



（a）电路图　　（b）电流波形

图 4-6　例 4.4 图

（2）计算 i 的基波分量 i_1 单独作用时产生的端电压 u_1：

$$X_{C(1)} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{6280\times50\times10^{-6}} \approx 3(\Omega)$$

$$Z_{(1)} = \frac{R(-\text{j}X_{C(1)})}{R-\text{j}X_{C(1)}} = \frac{1000\times(-\text{j}3)}{1000-\text{j}3} = 3\angle(-89.9^\circ)(\Omega)$$

电压的基波分量为：

$$\dot{U}_{(1)\text{m}} = Z_{(1)}\dot{I}_{(1)\text{m}}$$

$$= [3\angle(-89.9^\circ)]\times[1\times10^{-3}\angle0^\circ] = 3\angle(-89.9^\circ)\ (\text{mV})$$

（3）将已算出的直流电压和交流电压瞬时值叠加得端电压 u 的表达式为：

$$u = U_0 + u_1 = 1500 + 3\sin(6280t - 89.9^\circ)\ (\text{mV})$$

电容支路的电流为：

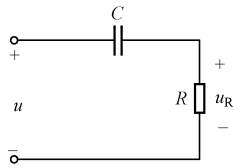
$$i_C = C\frac{\text{d}u}{\text{d}t} = 50\times10^{-6}\frac{\text{d}[1500+3\sin(6280t-89.9^\circ)]}{\text{d}t} = 0.942\sin(6280t+0.1^\circ)\ （\text{mA}）$$

由此表达式可出，电容支路电流没有直流分量。

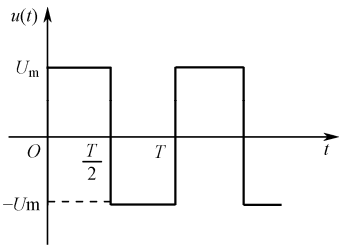
通过本例可以看出，由于容抗（3Ω）远远小于电阻（1kΩ），这就使得总电流中的交流分量有捷径可走，并联电容器对交流分量起到了旁路作用，这个作用在电子技术中得到了广泛应用。

例 4.5　在如图 4-7（a）所示的电路中 R=100Ω，C=10μF，Ω=500rad/s，外加方波电压 u 的波形如图 4-7（b）所示，其 U_m=10V。试求输出电压 u_R，并计算电阻电压的有效值 U_R 及电

阻吸收的平均功率 P。



（a）电路图



（b）u的波形图

图 4-7　例 4.5 图

解　（1）由表 4-1 查得图 4-7（b）所示的方波的傅里叶级数展开式为：

$$u(t)=\frac{4U_{\mathrm{m}}}{\pi}\left[\sin\omega t+\frac{1}{3}\sin 3\omega t+\frac{1}{5}\sin 5\omega t+\frac{1}{7}\sin 7\omega t+\cdots\right](\mathrm{V})$$

其中，ω为基波角频率。

取前四项进行计算，并将 U_{m}=10V，ω=500rad/s 代入，则上式可写成：

$$u(t)=\left(12.73\sin 500t+4.24\sin 1500t+2.55\sin 2500t+1.82\sin 3500t\right)(\mathrm{V})$$

（2）对各次谐波采用相量法求解：

电路对 k 次谐波的输出电压 u_R 的相量表达式为：

$$\dot{U}_{\mathrm{Rm(k)}}=\frac{R\dot{U}_{\mathrm{m(k)}}}{R-\mathrm{j}\dfrac{1}{k\omega C}}=\frac{100\dot{U}_{\mathrm{m(k)}}}{100-\mathrm{j}\dfrac{200}{k}}=\frac{\dot{U}_{\mathrm{m(k)}}}{1-\mathrm{j}\dfrac{2}{k}}$$

基波（k=1）作用时：

$$\dot{U}_{(1)\mathrm{m}}=12.73\angle 0^{\circ}\,\mathrm{V}\ (\mathrm{V})$$

$$\dot{U}_{\mathrm{R}(1)\mathrm{m}}=\frac{12.73\angle 0^{\circ}}{1-2\mathrm{j}}=5.69\angle 63.43^{\circ}\,\mathrm{V}\ (\mathrm{V})$$

$$P_{(1)}=\frac{1}{2}\times\frac{U_{\mathrm{R}(1)\mathrm{m}}^2}{R}=\frac{1}{2}\times\frac{5.69^2}{100}=0.162(\mathrm{W})$$

三次谐波（k=3）作用时：

$$\dot{U}_{(3)\mathrm{m}}=4.24\angle 0^{\circ}(\mathrm{V})$$

$$\dot{U}_{\mathrm{R}(3)\mathrm{m}}=\frac{4.24\angle 0^{\circ}}{1-\mathrm{j}\dfrac{2}{3}}=3.53\angle 33.7^{\circ}(\mathrm{V})$$

$$P_{(3)}=\frac{1}{2}\times\frac{U_{\mathrm{R}(3)\mathrm{m}}^2}{R}=\frac{1}{2}\times\frac{3.53^2}{100}=0.062(\mathrm{W})$$

同理可求得 5 次、7 次谐波作用时：

$$\dot{U}_{\mathrm{R}(5)\mathrm{m}}=2.37\angle 21.8^{\circ}\ (\mathrm{V}),\quad P_{(5)}=0.028\ (\mathrm{W})$$

$$\dot{U}_{\mathrm{R}(7)\mathrm{m}}=1.75\angle 15.95^{\circ}\ (\mathrm{V}),\quad P_{(7)}=0.015\ (\mathrm{W})$$

各次谐波作用时 u_{R} 的表达式分别为：

$$u_{R(1)}=5.69\sin(500t+63.43^\circ)\text{（V）}$$
$$u_{R(3)}=3.53\sin(1500t+33.7^\circ)\text{（V）}$$
$$u_{R(5)}=2.37\sin(2500t+21.8^\circ)\text{（V）}$$
$$u_{R(7)}=1.75\sin(3500t+15.95^\circ)\text{（V）}$$

（3）按时域形式叠加为：

$$u_R=u_{R(1)}+u_{R(3)}+u_{R(5)}+u_{R(7)}$$
$$=5.69\sin(500t+63.43^\circ)+3.53\sin(1500t+33.7^\circ)+2.37\sin(2500t+21.8^\circ)+1.75\sin(3500t+15.95^\circ)\text{(V)}$$
$$P=P_1+P_3+P_5+P_7=0.162+0.062+0.028+0.015=0.267\text{（W）}$$
$$U_R=\sqrt{U_{R(1)}^2+U_{R(3)}^2+U_{R(5)}^2+U_{R(7)}^2}=\sqrt{\frac{1}{2}\left(5.69^2+3.53^2+2.37^2+1.75^2\right)}=5.17\text{(V)}$$

从本例的分析过程中可以看出，随着谐波频率增加，容抗减少，该次谐波输出电压分量和输入电压分量的有效值之比增大，高次谐波很容易通过这个电路。利用感抗和容抗对各次谐波的反应不同，将电感和电容组成各种不同的电路，让某些所需频率分量顺利通过而抑制某些不需要的分量，这种电路称为滤波器，本例为高通滤波器。



实践操作 —— 做一做

利用仿真软件 Multisim9 测试非正弦周期电流电路的电压和电流的有效值。在 Multisim9 环境下创建图 4-8 所示电路。

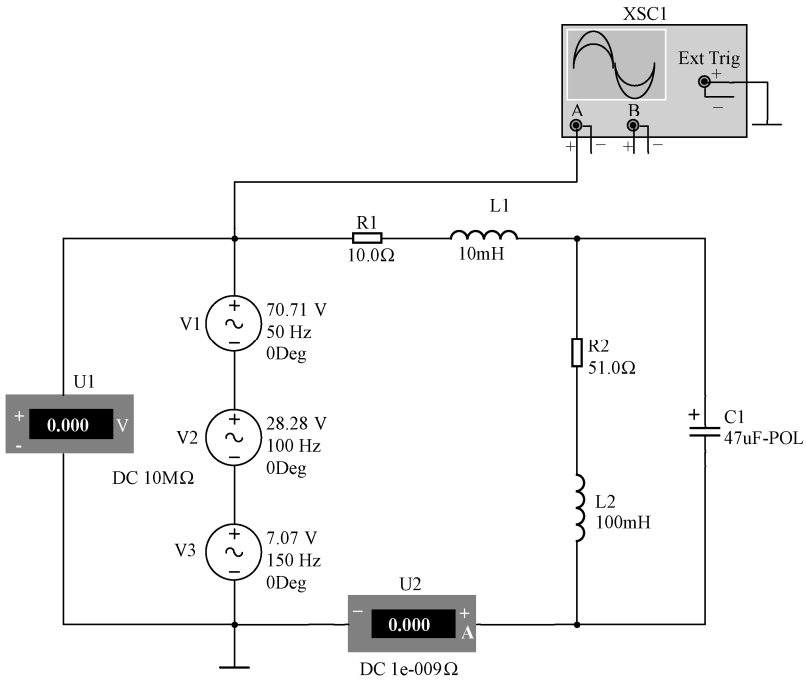


图 4-8　非正弦周期电流电路仿真图

按下“启动/停止”开关，启动仿真分析，等电路稳定后，用电压表和电流表分别测量电路端电压 U 及电流 I，将数据记入表 4-3 中，并与理论计算相比较。用示波器观察电源提供电压的波形。

表 4-3　非正弦周期电路的测量

	实际测量值	理论计算值	电路端电压的波形
电压（V）	U=	U=	
电流（A）	I=	I=	



问题研讨 —— 想一想

对图 4-8 所示电路的仿真结果与理论计算的结果是否存在误差？若有请分析误差产生的原因。

项目小结

1. 非正弦周期电流电路的稳态分析可采用谐波分析法，即首先应用数学中的傅里叶级数，将电路中的非正弦周期性激励信号分解为一系列不同频率的正弦分量之和，再根据线性电路的叠加原理，将非正弦电路转化为一系列不同频率的正弦电路的叠加。

2. 常见的非正弦交流电压或电流波形，通常可以把它展开成一个无穷三角级数，即

$$f(t)=A_0+\sum_{k=1}^{\infty}A_{\mathrm{km}}\cos(k\omega_1 t+\varphi_{\mathrm{k}})$$

3. 非正弦周期电流的有效值为：$I=\sqrt{I_0^{\,2}+I_1^{\,2}+I_2^{\,2}+\cdots}=\sqrt{I_0^2+\sum_{k=1}^{\infty}I_{\mathrm{k}}^2}$

非正弦周期电压的有效值为：$U=\sqrt{U_0^{\,2}+U_1^{\,2}+U_2^{\,2}+\cdots}=\sqrt{U_0^2+\sum_{k=1}^{\infty}U_{\mathrm{k}}^2}$

非正弦周期电量的平均值为：$A_{\mathrm{av}}=\dfrac{1}{T}\int_0^T|f(t)|\,\mathrm{d}t$

电路的平均功率为：$P=P_0+\sum_{k=1}^{\infty}U_{\mathrm{k}}I_{\mathrm{k}}\cos\varphi_{\mathrm{k}}$

4. 非正弦周期电流电路的分析计算步骤为：

（1）先将给定的电源电动势或电压展开成傅里叶级数；

（2）计算不同频率下的电抗值；

（3）分别求出电源电压的各次谐波分量单独作用时在各支路中产生的电流。

习　　题

4.1　有一个正弦电压 U=100V 加在一个电感 L 的两端时电流 I=10A，当电压中含有三次谐波分量且有效值仍为 100V 时，电流有效值为 8A，试求：此电压的基波和三次谐波分量的有效值。

4.2　电路如图 4-9 所示，已知：$\omega=10^4$rad/s，L=1mH，R=1kΩ，若 $u_0(t)$中不含基波，与 $u_i(t)$中的三次谐波完全相同，试确定参数 C_1 和 C_2。

4.3　电路图 4-10 所示，已知：$R=\omega L=1/(\omega C)=20\Omega$，$u(t)=10+100\cos\omega t+40\cos 3\omega t$ V。求 $i(t)$、$i_1(t)$和 $i_2(t)$。

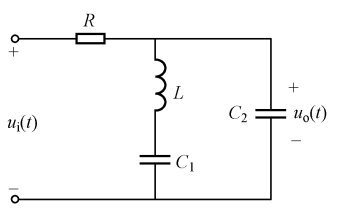


图 4-9

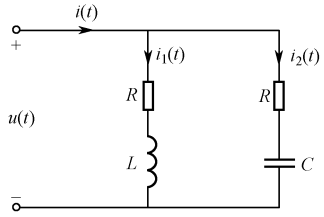


图 4-10

4.4　在 RLC 串联电路中，已知：R=6Ω，ωL=2Ω，$1/(\omega C)$=18Ω，电路端口施加电压 $u=10+30\sin(\omega t+30^{\circ})+18\sin 3\omega t$ V，试求：电流有效值及电路的平均功率。

4.5　电路如图 4-11 所示，已知：$u(t)=8+4\sin\omega t$ V，当 R=40Ω，$\omega L=1/(\omega C)$=40Ω时，求 $u_L(t)$和 $i_L(t)$的表达式。

4.6　电路如图 4-12 所示，已知 R=60Ω，图（a）中ωL=60Ω，图（b）中 $1/(\omega C)$=60Ω，电路端口施加电压 $u=100\sin\omega t+20\sin 3\omega t$ V，试求：图（a）和图（b）电路中的电流 i。

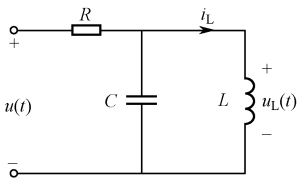


图 4-11

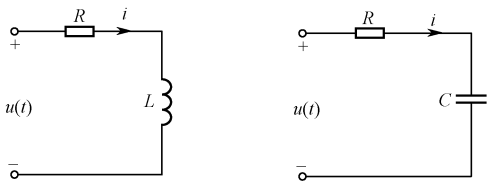


图 4-12

4.7　电路如图 4-13 所示，已知 R=100Ω，L=20mH，C=40μF，f=800Hz，$u_R=50+10\sqrt{2}\sin\omega t$ V，试求：（1）电源电压的瞬时值表达式和有效值；（2）电源提供的功率。

4.8　在 RL 串联电路中，电源电压 u=6+10sin2t V，$i=2+I_m\sin(2t-53.1^{\circ})$A，试用叠加原理计算：（1）$R$、$L$ 和 I_m；（2）若电压 u=10+5sint+5sin2t V 时，电流 i 的表达式。

4.9　在 RLC 串联电路中，已知$u_S=10+30\cos\omega t+15\sqrt{2}\cos 2\omega t$ V，ω=100rad/s，R=75Ω，L=0.5H，C=200μF，试求电流 i 及其有效值。

4.10　电路如图 4-14 所示，已知 $u=100+50\sin(\omega t)$ V，$\omega=10^3$rad/s，R=50Ω，L=25mH，C=20μF，试求电流 i 的瞬时值表达式和电路消耗的功率。

4.11　电路如图 4-15 所示，已知 $u=100+300\sin(\omega t)+100\sin 3\omega t$ V，$R=10\Omega$，$\omega L_1=3.75\Omega$，$\omega L_2=30\Omega$，$1/(\omega C)=30\Omega$，求电流 i 和电压 u_C。

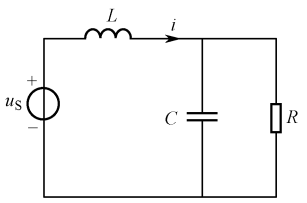


图 4-13

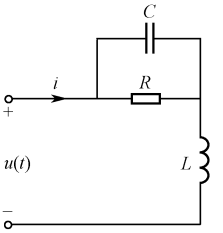


图 4-14

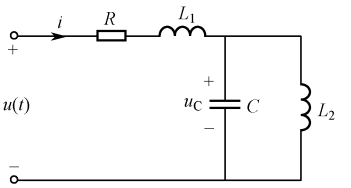


图 4-15

项目 5　变压器的认识与使用



项目内容

1. 磁场中的物理量及磁路的基本知识；
2. 互感现象和互感电压；
3. 变压器的用途、结构、工作原理与测试；
4. 三相变器及一些特殊变压器的工作原理及使用。



知识目标

1. 理解磁场中物理量的物理意义；
2. 了解铁磁物质的磁化特性和磁路的基本知识；
3. 理解互感现象，了解互感电压的计算；
4. 熟悉变压器的结构，理解变压器的铭牌数据和基本工作原理；掌握变压器的电压、电流和阻抗变换原理；
5. 掌握工程上常用的几种变压器的使用及注意事项。



能力目标

1. 会进行小型变压器的测试、维护与故障检修；
2. 能明确各种变压器的正确使用方法。



情感目标

1. 通过“感性认识—理性思考—知识提升与应用”的学习过程，逐步培养学生勤观察、勤思考、好动手的学习与工作习惯，并具有分析问题和解决问题的能力；
2. 逐步提高学生的专业意识、培养他们的高度的责任心和安全意识，遵章守纪、规范操作，使学生养成良好的科学态度和求是精神；
3. 锻炼信息、资料搜集与查找的能力。

任务 5.1　磁路的认识与测试

任务描述

电和磁是密不可分的。电气设备和电工仪表中就存在着电与磁的相互关系、相互作用，其中不仅有电路的问题，还有磁路的问题。在工程实践中，广泛应用机电能量转换器件和信号转换器件，如电机、变压器、互感器、储存器等，其工作原理和特性分析都是以磁路和带铁芯电路分析为基础的，只有同时掌握了电路和磁路的基本概念，才能对各种电气设备的工作原理进行全面的分析，并正确理解和使用这些器件。本任务学习磁路的基本知识。

任务目标

理解磁场中物理量的物理意义和互感现象，了解铁磁物质的磁化特性、磁路的基本知识和互感电压的计算。

任务实施

现象观察 —— 看一看

连接图 5-1 所示电路，线圈 L_1 和线圈 L_2 靠得很近，并且封装在一起，在 a、b 两端加电压源 U_S、用电压表并联在 c、d 两端测线圈 L_2 上的电压。观察开关 S 接通瞬间、断开瞬间电压表指针偏转情况。请思考：电压 U_S 是加在线圈 L_1 两端的，为什么在线圈 L_2 两端会有电压产生？

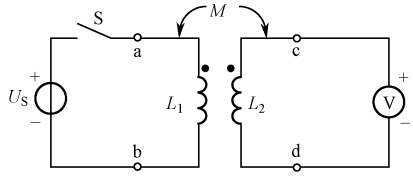


图 5-1　互感现象实验电路

知识链接 —— 学一学

5.1.1　磁路的基本知识

电和磁是密不可分的。电气设备和电工仪表中就存在着电与磁的相互关系、相互作用，这中间不仅有电路的联系，还有磁路的耦合。

能够吸引金属铁等物质的性质称为磁性，具有磁性的物体称为磁体，如扬声器背面的磁钢就是磁体。电子设备中的许多元器件都采用了磁性材料，各种变压器、电感器中的铁芯、磁芯的组成材料均为磁性材料。

磁铁是一个典型的磁体，如图 5-2 所示。磁铁两端磁性最强的区域称为磁极，一个磁铁有

两个磁极：一个是南极，用字母 S 表示；另一个是北极，用字母 N 表示。一块磁铁分割成几块后，每一小块磁铁上都有一个 S 极和一个 N 极，S 极、N 极总是成对出现的。S 极与 N 极之间存在着相互作用力，同极性相斥，异极性相吸，这一作用力称为磁力。



图 5-2　磁铁的磁极示意图

1. 磁场中的物理量

（1）磁通 Φ

磁通就是指垂直于磁场的某一面积 S 上所穿过的磁力线的数目，如图 5-3 所示。

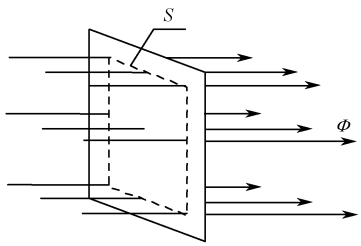


图 5-3　磁通

磁通用 Φ表示，单位是 Wb（韦伯）。实用中还用麦克斯韦（Mx）作为磁通的单位，它们之间的关系是：

$$1\text{Mx}=10^{-8}\text{Wb}$$

（2）磁感应强度 B

磁感应强度是表示磁场内某点的磁场强弱和方向的物理量，它是一个矢量。磁场内某一点的磁感应强度可用该点磁场作用于 1m 长、通有 1A 电流的导体上的力 F 来衡量，该导体与磁场方向垂直。磁感应强度 B 与电流 I 之间的方向关系可用右手螺旋定则来确定，其大小与导体的长度 L、通过导体的电流 I、导体受到的电磁力 F 之间的关系，可用下式表示：

$$B=\frac{F}{Il} \tag{5.1}$$

磁感应强度 B 的单位为 T（特斯拉）。在电机中，气隙中的磁感应强度 B 通常为（0.4～0.5）T，铁芯中约为（1～1.8）T。

磁感应强度 B 有时也可用与磁场垂直的单位面积的磁通来表示，即

$$B=\frac{\Phi}{S} \tag{5.2}$$

故 B 又称为磁通密度（简称磁密），式（5.2）中 Φ 的单位为 Wb（韦伯），S 的单位为 m^2（平方米），则 $1\text{T}=1\ \text{Wb/m}^2$。

工程中常用到一个较小的单位 Gs（高斯）来表示磁感应强度，它们之间的关系是：$1\text{Gs}=10^{-4}\text{T}$。

（3）磁导率μ

实验证明，在通电线圈中放入铁、钴、镍等物质后，通电线圈周围的磁场将大大增强，磁感应强度 B 增大；若放入铜、铝、木材等物质，通电线圈周围的磁场几乎没有什么变化。这个现象表明，磁感应强度 B 与磁场中介质导磁性质有关。

可以用磁导率μ来表示磁场中介质的导磁性能，单位为 H/m（亨利每米）。

磁导率值大的材料，导磁性能好。所谓的导磁性能好，指的是这类材料被磁化后能产生

很大的附加磁场。这类物质有铁、钴、镍及其合金，通常把这类物质称为铁磁性物质或磁性物质。

实验测得，真空的磁导率 μ_0 是个常数（又称为磁常数），为：

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \text{H/m}$$

其他介质的磁导率一般用与真空磁导率的倍数来表示（即相对磁导率），记为 μ_r：

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \tag{5.3}$$

μ_r 越大，介质的导磁性能就越好。$\mu_r > 1$ 但接近于 1 的物质称为顺磁物质，如空气的μ_r = 1.000003；$\mu_r < 1$ 且接近于 1 的物质称为逆磁物质，如铜的μ_r=0.999995；这两种物质的μ_r 都接近于 1，它们的导磁能力都和真空差不多，统称为非铁磁物质。实际上，非铁磁物质的磁导率μ值均可用真空磁导率μ_0 代替。$\mu_r >> 1$ 的物质称为铁磁物质，如铁、钴、镍以及它们的合金，导磁能力很强，如铸铁的 μ_r 大于 200；坡莫合金（一种铁镍合金）的μ_r 可达十万以上。这就是说，在相同磁动势的条件下，铁芯线圈的磁场比空心线圈的磁场要强几百、几千、几万倍，所以铁磁物质在电机、电器、磁电式电工仪表、电信和广播等设备中得到广泛应用，因此在线圈中通入不大的电流，就可产生足够强的磁场（即产生足够大的磁感应强度）。

应注意：同一铁磁物质的 μ_r 并不是常数，它随励磁电流的大小和温度的高低而变化。

表 5-1 列出了几种铁磁物质在室温下的最大相对磁导率。

表 5-1　几种铁磁物质的相对磁导率

铁 磁 物 质	μ_r	铁 磁 物 质	μ_r
钴	174	已经退火的铁	7000
未经退火的铸铁	240	变压器硅钢片	7500
已经退火的铸铁	620	镍铁合金	12950
镍	1120	C 型坡莫合金	115000
软钢	2180	锰锌铁氧体	300~5000

（4）磁场强度 H

上面提到，铁磁性物质的磁导率不是常数，它随磁感应强度的大小而变化，反过来说，磁感应强度 B 与物质的磁导率μ有关，这给对磁场的分析和计算带来不便，为此引入一个辅助量，叫磁场强度 H，它定义为：

$$H = \frac{B}{\mu} \tag{5.4}$$

即磁场中某点的磁感应强度与磁导率的比值。

显然 H 与物质的磁导率无关，所以它不受介质的影响，而只与电流产生的磁场有关。若 B 的单位用 T（即 Wb/m^2），μ的单位用 H/m， 则 H 的单位为 A/m（安培每米）。

2. 铁磁物质的磁性能

（1）铁磁物质的磁化曲线

实验表明：将铁磁性物质（如铁、镍、钴等）置于某磁场中，会大大加强原磁场。这是由于铁磁物质在外加磁场的作用下，能产生一个与外磁场同方向的附加磁场，正是由于这个

附加磁场促使了总磁场的加强，这种现象称为磁化。

不同种类的铁磁物质，其磁化性能是不同的。工程上常用磁化曲线（或表格）表示各种铁磁物质的磁化特性。磁化曲线是铁磁物质的磁感应强度 B 与外磁场的磁场强度 H 之间的关系曲线，所以又称为 B–H 曲线。

图 5-4 所示的 B–H 曲线是在铁芯原来没有被磁化，即 B 和 H 均从零开始增加时所测得的。这种情况下绘出的 B–H 曲线称为起始磁化曲线，起始磁化曲线大体上可以分为四段，即 Oa、ab、bc 和 c 点以后。下面分别加以说明。

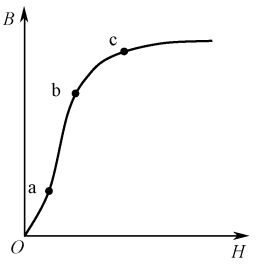


图 5-4　起始磁化曲线

Oa 段：此段斜率较小，当 H 增加时，B 增加缓慢。这反映了磁畴有“惯性”，较小的外磁场不能使它转向为有序排列。

ab 段：此段可以近似看成是斜率较大的一段直线。随着 H 加大，B 增大较快。这是由于原来不规则的磁畴在 H 的作用下，迅速沿着外磁场方向排列的结果。

bc 段：此段的斜率明显减小，即随着 H 的加大，B 增大缓慢。这是由于绝大部分磁畴已转向为外磁场方向，所以 B 增大的空间不大。b 点附近称为 B–H 曲线的膝部。在膝部可以用较小的电流（较小的 H），获得较大的磁感应强度（B）。所以电机、变压器的铁芯常设计在膝部工作，以便用小电流产生较强的磁场。

c 点以后：c 点后随着 H 加大，B 几乎不增大。这是由于几乎所有磁畴都已转向为外磁场方向，即使 H 加大，附加磁场也不可能再增大。这个现象称为铁磁性物质的磁饱和，c 点以后的区域叫饱和区。

（2）磁滞回线

起始磁化曲线只反映了铁磁性物质在外磁场（H）由零逐渐增加的磁化过程。在很多实际应用中，外磁场（H）的大小和方向是不断改变的，即铁磁性物质受到交变磁化（反复磁化），实验表明交变磁化的曲线如图 5-5 所示，这是一个回线。此回线表示，当铁磁性物质沿起始磁化曲线磁化到 a 点后，若减小电流（H 减小），B 也随之减小，但 B 不是沿原来起始磁化曲线减小，而是沿另一路径 ab 减小，特别是当 I=0（即 H=0）时，B 并不为零。B=B_r（Ob 段），B_r 叫剩磁，这种现象叫磁滞。磁滞现象是铁磁性物质所特有的。要消除剩磁（常称为去磁或退磁），需要反方向加大 H，也就是 bc 段，当 H=$-H_c$（Oc 段）时，B=0，剩磁才被消除，此时的 $|-H_c|$ 称为材料的矫顽力。$|-H_c|$ 的大小反映了材料保持剩磁的能力。

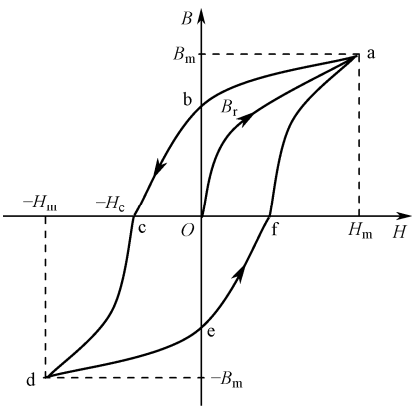


图 5-5　磁滞回线

如果继续反向加大 H，使 H=$-H_m$，B=$-B_m$，再让 H 减小到零（de 段），再加大 H，使 H=H_m，B=B_m（efa 段），这样反复，便可得到对称于坐标原点的闭合曲线，称为铁磁性物质的磁滞回线（abcdefa），如图 5-5 所示。

从图 5-5 中可看出，铁磁材料在反复磁化过程中，B 的变化始终落后于 H 的变化，这种现象叫磁滞现象。磁滞现象可以用磁畴来解释。所谓磁畴，就是由分子电流形成的磁性小区域，每个磁畴就像一个很小的永久磁体。在无外磁场作用时，这些磁畴排列杂乱无章，它们

的磁性相互抵消，对外不显磁性。在外磁场的作用下，磁畴趋向外磁场的方向，产生一个很大的附加磁场和外磁场相加。所以，Oa 起始段磁感应强度 B 上升很快；随着 H 增加，大部分磁畴已取向外磁场方向排列，B 增长很慢，出现了饱和现象。

根据以上分析可知，铁磁材料具有以下磁性能：

高导磁性：铁磁材料的磁导率远大于非磁性材料的磁导率，且铁磁材料的磁导率μ值不是常数，随 H 的大小而改变。

磁饱和性：铁磁材料的磁感应强度 B 有一个饱和值 B_{m}。

磁滞性：在铁磁材料的反复磁化过程中，B 的变化总是落后于 H 的变化，这就是铁磁材料的磁滞性。剩磁现象就是铁磁材料磁滞性的表现。

磁滞损耗：铁磁材料在反复磁化过程中，磁畴来回翻转，必然克服阻力做功，铁芯发热。这种在反复磁化过程中的能量损失叫磁滞损耗。

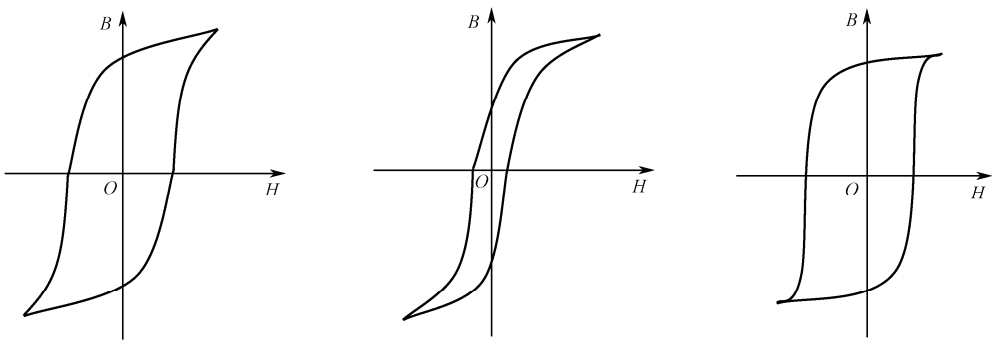
（3）铁磁物质的分类

铁磁性物质根据磁滞回线的形状及其在工程上的用途可以分为如下三类。

① 硬磁材料。硬磁材料的特点是磁滞回线较宽，剩磁和矫顽力都较大。这类材料在磁化后能保持很强的剩磁，适宜制作永久磁铁。常用的有铁镍钴合金、镍钢、钴钢、镍铁氧体、锶铁氧体等。在磁电式仪表、电声器材、永磁发电机等设备中所用的磁铁就是用硬磁材料制作的。硬磁材料的磁滞回线如图 5-6（a）所示。

② 软磁材料。软磁材料的特点是磁导率高，磁滞回线狭长，磁滞损耗小。软磁材料又分为低频和高频两种。用于高频的软磁材料要求具有较大的电阻率，以减小高频涡流损失。常用的高频软磁材料有铁氧体等，如收音机中的磁棒、无线电设备中的中频变压器的磁芯，都是用铁氧体制成的。

用于低频的有铸钢、硅钢、坡莫合金等。电机、变压器等设备中的铁芯多为硅钢片，录音机中的磁头铁芯多用坡莫合金。软磁材料的磁滞回线如图 5-6（b）所示。



（a）硬磁物质　　（b）软磁物质　　（c）矩磁材料

图 5-6　铁磁物质的磁滞回线

③ 矩磁材料。矩磁材料其磁滞回线近似于一个矩形，磁滞回线如图 5-6（c）所示。它的特点是受较小的外磁场作用就能达到磁饱和，去掉外磁场后，仍保持磁饱和状态。实际生产中，广泛采用锰–镁或锂–镁矩磁铁氧体制成记忆磁芯，它是电子计算机和远程控制设备中的重要元件。

3. 磁路和磁路欧姆定律

（1）磁路

诸如变压器、电机、磁电式仪表等电工设备，为了获得较强的磁场，常常将线圈缠绕在具有一定形状的铁芯上，如图 5-7 所示。铁芯是一种铁磁材料，它具有良好的导磁性能，能使绝大部分的磁通从铁芯中通过，同时铁芯被线圈磁场磁化后能产生较强的附加磁场，它叠加在线圈磁场上，使磁场大为加强，或者说，线圈通以较小的电流便可产生较强的磁场。有了铁芯，可使磁通集中地通过一定的闭合路径。所谓磁路，主要是由铁磁材料构成而为磁通集中通过的闭合回路。集中在一定路径上的磁通称为主磁通，如图 5-7 所示的ϕ，主磁通经过的磁路通常由铁芯（铁磁材料）及空气隙组成。不通过铁芯，仅与本线圈交链的磁通称为漏磁通，如图 5-7（a）所示的ϕ_σ。在实际应用中，由于漏磁通很少，有时可忽略不计它的影响。

主磁通磁路有纯铁芯磁路，如图 5-7（a）、（c）所示；也有包含有气隙的磁路，如图 5-7（b）所示；磁路可无分支磁路，如图 5-7（a）、（b）所示；也可有分支磁路，如图 5-7（c）所示。

磁路中的磁通可由线圈通过的电流产生，如图 5-7 所示。用来产生磁通的电流叫励磁电流，流过励磁电流的线圈叫励磁线圈。由直流电流励磁的磁路叫直流磁路，由交流电流励磁的磁路叫交流磁路。本章所述的变压器和异步电动机等均为交流磁路。

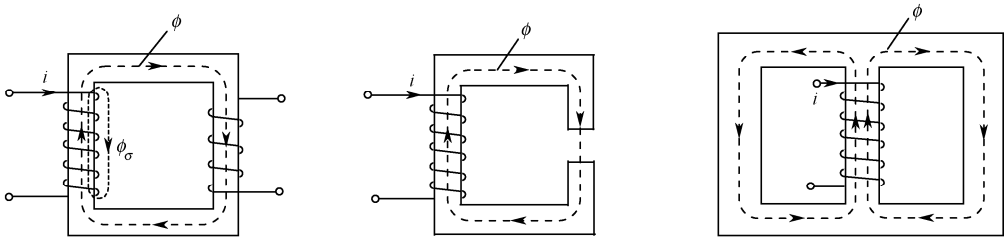


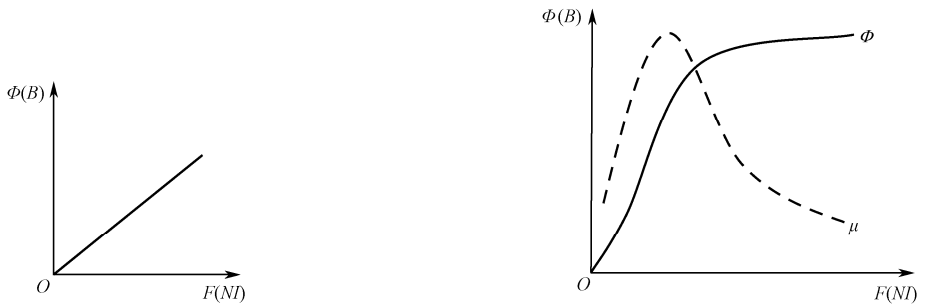
图 5-7　磁路的几种形式

（2）磁路的欧姆定律

上面提到励磁线圈通过励磁电流就会产生磁通（即电生磁），通过实验发现，励磁电流 I 越大，产生的磁通就越多；线圈匝数越多，产生的磁通也越多。人们把励磁电流 I 和线圈匝数 N 的乘积 IN 看成是磁路中产生磁通的源泉，称为磁通势 F，它犹如电路中电动势是产生电流的源泉那样。磁通势的单位为 A（安培）。

空心线圈的磁通与产生它的励磁电流成正比关系，$\Phi=f(F)$曲线为一条过原点的直线，如图 5-8（a）所示，说明其磁通随电流按比例增长。而铁芯线圈的磁通与产生它的励磁电流之间不成正比关系，$\Phi=f(F)$曲线如图 5-8（b）所示。开始时，Φ 随 F 基本上按比例增长；过后 Φ 随 F 增长的速度变慢，此时便说明磁路开始饱和了，Φ 几乎不再随 F 增长，即 Φ 很难再增长了，此时说明磁路饱和了（磁路饱和与否取决于磁感应强度 B，由于磁路截面积 S 一定，$\Phi \propto B$，故纵坐标也可用 B 表示）。

由此可知，空心线圈（非铁磁性物质）磁路不饱和，为线性磁路。而铁芯（铁磁性物质）磁路饱和，为非线性磁路。Φ 始终能随 F 按比例增长，其导磁性能不变，故其磁导率μ随磁路的饱和而减小。



（a）空心线圈的$\Phi=f(F)$曲线　　（b）铁芯线圈的$\Phi=f(F)$曲线

图 5-8　磁通随磁通势变化曲线（磁化曲线）

磁通 Φ 由磁通势 F 产生，它的大小除与磁通势有关外，还与铁芯的材质的磁导率、铁芯磁路的截面积、磁路长度有关。当磁通势一定时：铁芯材质的磁导率μ越高，磁通就越多；铁芯磁路截面积 S 越大，磁通也越多；铁芯磁路 l 越长，磁通却越少。它们间的关系为：

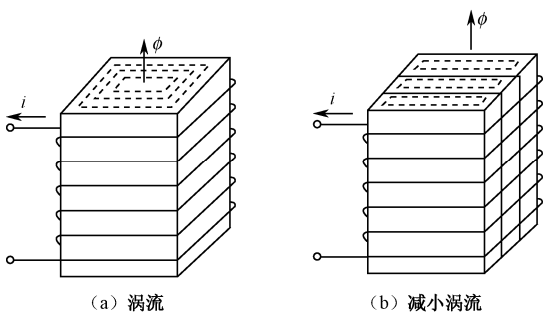
$$\Phi = F\frac{\mu S}{l} = \frac{F}{l/(\mu S)} = \frac{F}{R_{\mathrm{m}}} \tag{5.5}$$

式中，$R_{\mathrm{m}} = l/(\mu S)$，称为磁阻，是表示磁路对磁通起阻碍作用的物理量，它仅与磁路的材质及几何尺寸有关，单位为 H^{-1}（每亨利）。式（5.5）的结构形式与电路欧姆定律相似，故称之为磁路的欧姆定律。但由于μ不是常数，它随励磁电流而变，所以不能直接应用磁路的欧姆定律来计算，它只能用于定性分析。

磁路与电路有很多相似之处，如磁路中的磁通由磁通势产生，而电路中的电流由电动势产生；磁路中有磁阻，它使磁路对磁通起阻碍作用，而电路中有电阻，它使电路对电流起阻碍作用；磁阻与磁导率μ、磁路截面积 S 成反比，与磁路长度 l 成正比，而电阻也与电导率 γ、电路导线截面积 S 成反比，与电路长度 l 成正比。

4. 涡流

当线圈中通过变化的电流 i 时，在铁芯中穿过的磁通也是变化的。由于构成磁路的铁芯是导体，于是在铁芯中将产生感应电流，如图 5-9（a）中的虚线所示。由于这种感应电流是一种自成闭合回路的环流，故称为涡流。



（a）涡流　　（b）减小涡流

图 5-9　涡流

在交流电气设备中，交变电流的交变磁通在铁芯中产生涡流，会使铁芯发热而消耗电功率，称为涡流损耗，它与磁滞损耗合称为铁损。在磁饱和状态下，铁损的大小与铁芯中磁感应强度的平方（B_m^2）成正比。

为了减小铁芯中的涡流，铁芯通常采用 0.35~0.5mm 的硅钢片叠成，如图 5-9（b）所示。硅钢片间有绝缘层（涂绝缘漆）。由于硅钢片具有较大的电阻率和较小的剩磁，所以它的涡流损耗与磁滞损耗都比较小。

在电机和电器铁芯中的涡流是有害的。因为它不仅消耗电能，使电气设备效率降低，而且涡流损耗转变为热量，使设备温度升高，严重时将影响设备的正常运行。在这种情况下，要尽量减小涡流。

涡流虽然在很多电器中会引起不良后果，但在另一些场合下，人们却利用涡流为生产、生活服务。例如工业上利用涡流产生的热量来熔化金属，日常生活中的电磁灶也是利用涡流的原理制成的，它给人们的生活带来很大的便利。

5.1.2　互感与互感电压

线圈的电流使线圈自身具有磁性，线圈的电流变化时，使线圈的磁链也变化，并在其自身引起了感应电压，这种电磁现象叫自感现象。互感现象也是电磁感应现象中的一种，在工程实际中应用也很广泛，如变压器和收音机的输入回路，都是应用互感这一原理制成的。

1. 互感现象

图 5-10 表示两个线圈，匝数分别为 N_1、N_2。在线圈 1 中通以交流电流 i_1，使线圈 1 具有的磁通ϕ_{11}叫自感磁通，$\Psi_{11}=N_1\phi_{11}$叫线圈 1 的自感磁链。由于线圈 2 处在 i_1所产生的磁场之中，ϕ_{11}的一部分穿过线圈 2，线圈 2 具有的磁通ϕ_{21}称为互感磁通，$\Psi_{21}=N_2\phi_{21}$称为互感磁链。这种由于一个线圈电流的磁场使另一个线圈具有的磁通、磁链分别称为互感磁通、互感磁链。

由于 i_1 的变化引起 Ψ_{21} 的变化，从而引起线圈 2 中产生的电压叫互感电压。同理线圈 2 中电流 i_2 的变化，也会在线圈 1 中产生互感电压。这种由一个线圈的交变电流在另一个线圈中产生感应电压的现象称为互感现象。

为明确起见，磁通、磁链、感应电压等应用双下标表示。第一个下标代表该量所在线圈的编号，第二个下标代表产生该量的原因所在线圈的编号。例ϕ_{21}表示由线圈 1 产生的穿过线圈 2 的磁通。

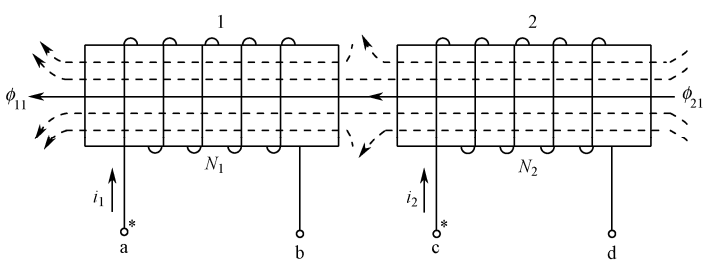


图 5-10　互感应现象

2. 互感系数

在非铁磁性的介质中，电流产生的磁通与电流成正比，当匝数一定时，磁链也与电流大小成正比。当选择电流的参考方向与它产生的磁通的参考方向满足右手螺旋定则关系时可得：$\Psi_{21} \propto i_1$。设比例系数为 M_{21}，则 $\Psi_{21}=M_{21}\, i_1$，$M_{21}=\Psi_{21}/i_1$。M_{21} 称为线圈 1 对线圈 2 的互感系数，简称互感。同理，线圈 2 对线圈 1 的互感为：$M_{12}=\Psi_{12}/i_2$。

实践证明，$M_{12}=M_{21}$，两线圈间的互感系数用 M 表示，即 $M=M_{12}=M_{21}$。互感 M 的单位是亨（H）。

线圈间的互感 M 不仅与两线圈的匝数、形状及尺寸有关，还与线圈间的相对位置和磁介质有关。当用铁磁材料作为介质时，M 将不是常数。本书只讨论 M 为常数的情况。

3. 耦合系数

两个耦合线圈的电流所产生的磁通，一般情况下，只有部分相交链。两耦合线圈相交链的磁通越多，说明两个线圈耦合越紧密。为了能定量地表征两个线圈之间磁耦合的紧密程度，人们引入了耦合系数 k，它定义为：

$$k=\frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \tag{5.6}$$

可以证明，$0 \leqslant k \leqslant 1$。

当两个线圈的轴向互相垂直或两个线圈相隔很远时，$k \approx 0$，属于松耦合，在电信系统中，一般采取垂直架设的方法来减少输电线对电信线路的电磁干扰；当两个线圈绕在同一轴上时，$k \approx 1$，属于紧耦合，电力变压器各绕组之间就属于这种情况，$k \approx 0.95$；理想情况下 $k=1$，称为全耦合。所以改变线圈的相互位置，可以相应地改变 M 的大小。

4. 互感电压

互感电压与互感磁链的关系也遵守电磁感应定律。与讨论自感现象相似，选择互感电压与互感磁链两者的参考方向符合右手螺旋定则关系时，因线圈 1 中电流 i_1 的变化在线圈 2 中产生的互感电压为

$$u_{21}=\frac{\mathrm{d}\Psi_{21}}{\mathrm{d}t}=M\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} \tag{5.7}$$

同理，因线圈 2 中电流 i_2 的变化在线圈 1 中产生的互感电压为

$$u_{12}=\frac{\mathrm{d}\Psi_{12}}{\mathrm{d}t}=M\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} \tag{5.8}$$

由式（5.7）和式（5.8）可看出，互感电压的大小取决于电流的变化率。当 $\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}>0$ 时，互感电压为正值，表示互感电压的实际方向与参考方向一致；当 $\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}<0$ 时，互感电压为负值，表明互感电压的实际方向与参考方向相反。

当线圈中通过的电流为正弦电流时，如 $i_1=I_{1\mathrm{m}}\sin\omega t$，$i_2=I_{2\mathrm{m}}\sin\omega t$，则

$$u_{21}=M\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}=M\frac{\mathrm{d}(I_{1\mathrm{m}}\sin\omega t)}{\mathrm{d}t}=\omega MI_{1\mathrm{m}}\cos\omega t=\omega MI_{1\mathrm{m}}\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)$$

同理

$$u_{12}=\omega MI_{2\mathrm{m}}\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)$$

互感电压可用相量表示为：

$$\begin{aligned}\dot{U}_{21}&=\mathrm{j}\omega M\dot{I}_1=\mathrm{j}X_{\mathrm{M}}\dot{I}_1\\ \dot{U}_{12}&=\mathrm{j}\omega M\dot{I}_2=\mathrm{j}X_{\mathrm{M}}\dot{I}_2\end{aligned}\tag{5.9}$$

式中，$X_{\mathrm{M}}=\omega M$ 称为互感抗，单位为欧姆（Ω）。

值得注意的是，运用式（5.7）和式（5.8）计算互感电压时，必须使互感电压与互感磁通的参考方向符合右手螺旋定则关系。

5.1.3　绕组的同极性端及测定

1. 绕组的同极性端

分析线圈的自感电压和电流方向关系时，只要选择自感电压与电流为关联参考方向，就满足 $u_{\mathrm{L}}=L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$ 关系，不必考虑线圈的实际绕向问题。当线圈电流增加时（$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t>0$），自感电压的实际方向与电流实际方向一致；当线圈电流减少时（$\mathrm{d}i/\mathrm{d}t<0$），自感电压的实际方向与电流实际方向相反。

分析线圈互感电压和电流方向关系时，仅仅规定电流的参考方向是不够的，还需要知道线圈各自的绕向以及两个线圈的相对位置。那么能否像确定自感电压那样，在选定了电流的参考方向后，就可直接运用公式计算互感电压，而无须每次都考虑线圈的绕向及相对位置？解决这个问题就要引入同极性端的概念。

若两线圈的电流分别从端钮 1 和端钮 2 流入时，每个线圈的磁通的方向一致，即磁通是加强的，则端钮 1、2 就称为同极性端（或称同名端）；否则若两个线圈的磁通方向相反，即磁通减弱，则端钮 1、2 称为异极性端（或称异名端）。如图 5-10 所示的两线圈 1、2，i_1、i_2 分别从端钮 a、c 流入，线圈 1 和线圈 2 的磁通的方向一致，是加强的，则线圈 1 的端钮 a 和线圈 2 的端钮 c 为同极性端。显然端钮 b 和端钮 d 也是同极性端，而端钮 a、d 及 b、c 则是异极性端。

同极性端用符号“*”、“△”或“•”标记。为了便于区别，仅在两个线圈的一对同极性端用标记标出，另一对同极性端不需标注，如图 5-10 所示。

注意，同极性端上电压的实际极性总是相同的。用同极性端来反映磁耦合线圈的相对绕向，从而在分析互感电压时不需要考虑线圈的实际绕向及相对位置。

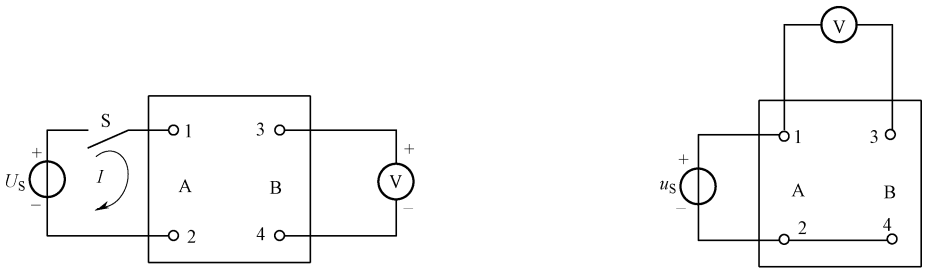
2. 绕组同极性端的测定

如果已知磁耦合线圈的绕向及相对位置，同极性端便很容易利用其概念进行判定。但是，实际的耦合线圈的绕向一般是无法确定的，因而同极性端就很难判别，这就要用实验法进行同极性端的测定。

实验法测定同极性端有直流法和交流法两种。

（1）直流法

图 5-11（a）中 1、2 为一个线圈，用 A 表示，3、4 为另一个线圈，用 B 表示，把线圈 A 通过开关 S 与电源连接，线圈 B 与直流电压表（或直流电流表）连接。当开关 S 迅速闭合时，就有随时间逐渐增大的电流 i 从电源的正极流入线圈 A 的 1 端，若此时电压表（或电流表）的指针正向偏转，则线圈 A 的 1 端和线圈 B 的 3 端（即线圈 B 与电压表“+”端相接的一端）为同极性端。这是因为当电流刚流进线圈 A 的 1 端时，1 端的感应电动势为“+”，而电压表正向偏转，说明 3 端此时也为“+”，所以 1、3 端为同极性端。若电压表反向偏转，则 1、3 端为异极性端。



（a）直流法　　（b）交流法

图 5-11　同极性端的测定

（2）交流法

如图 5-11（b）所示，把两个线圈的任意两个接线端连在一起，例如 2 和 4，并在其中一个线圈（例如 A），加上一个较低的交流电压。用交流电压表分别测量 U_{12}、U_{13}、U_{34}。

如果测得：$U_{13}=U_{12}-U_{34}$，则 1 和 3 端为同极性端。这是因为只有 1 端和 3 端同时为“+”或同时为“−”时，才可能使 U_{13} 等于 U_{12} 与 U_{34} 之差，所以，1 端和 3 端为同极性端。若测得：$U_{13}=U_{12}+U_{34}$，则 1、3 为异极性端。

5.1.4　互感线圈连接

1. 互感线圈串联

（1）顺向串联

所谓顺向串联，就是把两线圈的异极性端相连，如图 5-12 所示。在这种连接方式中，电流将从两线圈的同极性端流进或流出。顺向串联时的等效电感为：

$$L_F=L_1+L_2+2M \tag{5.10}$$

（2）反向串联

所谓反向串联，就是把两线圈的同极性端相连，如图 5-13 所示，电流从两线圈的异极性端流进或流出。反向串联的等效电感为：

$$L_R=L_1+L_2-2M \tag{5.11}$$

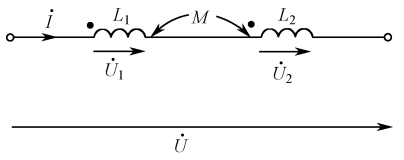


图 5-12　顺向串联

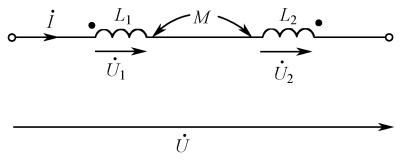


图 5-13　反向串联

由式（5.10）和式（5.11）可以看出，两线圈顺向串联时的等效电感大于两线圈的自感之和，而两线圈反向串联时的等效电感小于两线圈的自感之和。从物理本质上说明顺向串联时，电流从同极性端流入，两磁通相互增强，总磁链增加，等效电感增大；而反向串联时情况相反，总磁链减小，等效电感减小。

了解这些结论是有实际意义的。例如，某变压器原绕组有两个，每个原绕组的额定电压为 110V，若变压器接到 220V 的交流电源上使用，则应把两个原绕组串联；当电源电压为 110V 时，则应把两个原绕组并联。怎样连接呢？正确的接法应该是串联时异极性端相连，并联时同极性端相连，否则在额定电压下线圈会立即烧坏。这是因为在变压器的情况下，互感很大，在反向串联时其等效电感很小，因而其等效阻抗很小，导致了很大电流通过线圈，这样会烧坏线圈。此外，本例提示大家，根据有互感的线圈串联时电感随 M 而变化的关系，将两个相对位置可以改变的线圈串联起来，能够制成可变电感器。

根据 L_F 和 L_R 可以求出两线圈的互感 M 为：

$$M=\frac{L_F-L_R}{4} \tag{5.12}$$



应用举例 —— 练一练

例 5.1　两个磁耦合线串联接到 220V，50Hz 的正弦交流电源上，一种连接情况的电流为 2.7A，功率为 219W；另一种连接情况的电流为 7A。试分析哪种情况为顺向串联，哪种情况为反向串联，并求它们的互感。

解　由于顺向串联时的总感抗、总阻抗比反向串联时大，在相同的端电压作用下，顺向串联时的电流比反向串联时的小，所以电流为 2.7A 的情况是顺向串联，电流为 7A 的情况为反向串联。

顺向串联时：

$$P=I^2(R_1+R_2)$$

$$R_1+R_2=\frac{P}{I^2}=\frac{219}{2.7^2}=30(\Omega)$$

$$|Z_F|=\sqrt{(R_1+R_2)^2+(\omega L_F)^2}$$

$$L_F=\frac{1}{\omega}\sqrt{|Z_F|^2-(R_1+R_2)^2}=\frac{1}{314}\times\sqrt{\left(\frac{220}{2.7}\right)^2-30^2}=0.24(\mathrm{H})$$

即

$$L_F=L_1+L_2+2M=0.24(\mathrm{H})$$

反向串联时：

$$L_{\mathrm{R}}=\frac{1}{\omega}\sqrt{|Z_{\mathrm{R}}|^{2}-(R_{1}+R_{2})^{2}}=\frac{1}{314}\times\sqrt{\left(\frac{220}{7}\right)^{2}-30^{2}}=0.03(\mathrm{H})$$

即

$$L_{\mathrm{R}}=L_{1}+L_{2}-2M=0.03(\mathrm{H})$$

所以互感为：

$$M=\frac{L_{\mathrm{F}}-L_{\mathrm{R}}}{4}=\frac{0.24-0.03}{4}=0.053(\mathrm{H})$$

可用此法通过实验测量互感。

2. 互感线圈的并联

互感线圈的并联也有两种连接方式，一种是两个线圈的同极性端相连，称为同侧并联；另一种是两个线圈的异极性端相连，称为异侧并联。

（1）同侧并联

如图 5-14 所示的电路，为两线圈同侧并联，可推导出其等效电感 L' 为：

$$L'=\frac{L_{1}L_{2}-M^{2}}{L_{1}+L_{2}-2M} \tag{5.13}$$

（2）异侧并联

如图 5-15 所示的电路，为两线圈异侧并联，其等效电感为

$$L''=\frac{L_{1}L_{2}-M^{2}}{L_{1}+L_{2}+2M} \tag{5.14}$$

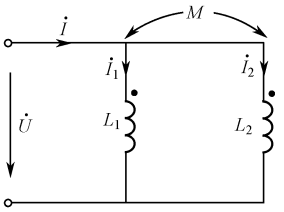


图 5-14　互感线圈的同侧并联

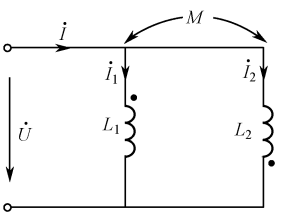


图 5-15　互感线圈的异侧并联



实践操作 —— 做一做

（1）分别用直流法和交流法测定两个磁耦合线圈的同极性端。

（2）将两个磁耦合的线圈分别进行顺向、反向串联接到 220V，50Hz 的正弦交流电源上，分别测量两种情况下的电流和功率，从而测出它们的互感。



问题研讨 —— 想一想

（1）两个形状、大小和匝数完全相同的环形线圈，其中一个用木芯，另一个用铁芯，当两线圈通以等值的电流时，木芯和铁芯中的 Φ、B 值是否相等？为什么？

（2）两个形状、大小和匝数完全相同的环形铁芯线圈，铁芯的材料和几何尺寸也完全相

同；但一个环形铁芯有断裂隙缝，另一个完好无损。当两线圈通以等值的电流时，两铁芯中的Φ、B 值是否相等？为什么？

（3）在实践操作中，若不测量电路的功率，只测量电路的电流，怎样测量两个磁耦合的线圈的互感？

（4）互感现象与自感现象有何不同？

任务 5.2　变压器的认知与测试

任务描述

变压器和电动机是以电磁感应原理为工作基础的。变压器在电力线路中用于电能的传输，在电子电路中用于信号的变换，是电工、电子电路中的重要设备和器件。本任务学习变压器和其他用途变压器的用途、结构、工作原理分析及测试。

任务目标

熟悉各种类型变压器的结构和用途；理解变压器的基本工作原理；掌握变压器的电压、电流和阻抗变换原理；掌握自耦变压器、电压互感器、电流互感器、钳形电流表的作用、接线及测试方法。

任务实施

知识先导 —— 认一认

观察图 5-16 所示的一些常用变压器的外形。

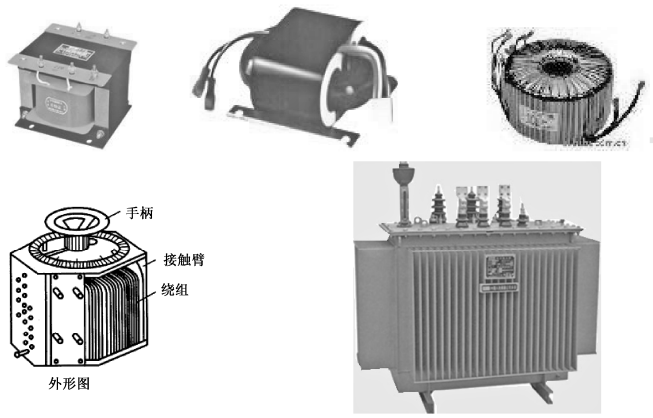


图 5-16　常见变压器的外形



5.2.1 单相变压器的认知

1. 变压器的用途

变压器是根据电磁感应原理制成的一种静止的电器，用它可把某一电压下的交流电能变换为同频率的另一电压下的交流电能。

输送电能时，若采用的电压愈高，则输电线路中的电流愈小，因而可以减少输电线路上的损耗，节约导电材料。所以远距离输电采用高电压是最为经济的。

目前，我国交流输电的电压最高已达 500kV。这样高的电压，无论从发电机的安全运行方面或是从制造成本方面考虑，都不允许由发电机直接生产。

发电机的输出电压一般有 3.15kV、6.3kV、10.5kV、15.75kV 等几种，因此必须用升压变压器将电压升高才能远距离输送。电能输送到用电区域后，为了适应用电设备的电压要求，还需通过各级变电所（站）利用变压器将电压降低为各类电器所需要的电压值。在用电方面，多数用电器所需的电压是 380V、220V 或 36V，少数电机也采用 3kV、6kV 等。所以升压、降压都需要用变压器。

变压器的种类很多，按其用途不同，有电源变压器、控制变压器、电焊变压器、自耦变压器、仪用互感器等。变压器种类虽多，但基本原理都是一样的。

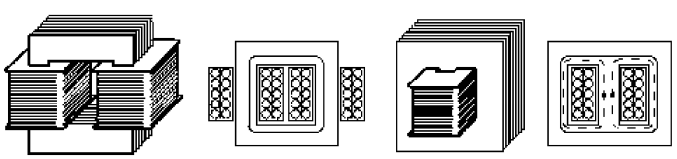
变压器除用来变换电压外，在各种仪器、设备上还广泛应用变压器的工作原理来完成某些特殊任务。例如，冶炼金属用的电炉变压器；整流装置用的整流变压器；输出电压可以调节的自耦变压器等，它们的结构形状虽然各有特点，但其工作原理基本上是一样的。

2. 变压器的结构

构成变压器的主要部件是铁芯和绕组。

变压器铁芯用磁滞损耗很小的硅钢片（厚度为 0.35～0.5mm）叠装而成，片间相互绝缘，以减小涡流损失。

按绕组与铁芯的安装位置，变压器可分为心式和壳式两种。心式变压器的绕组套在各铁芯柱上，如图 5-17（a）所示；壳式变压器的绕组只套在中间的铁芯柱上，绕组两侧被外侧铁芯柱包围，如图 5-17（b）所示。电力变压器多采用心式，小型变压器多采用壳式。



（a）心式　　（b）壳式

图 5-17　变压器的结构外形

变压器绕组可分为同心式和交叠式两类。同心式绕组的高、低压绕组同心地套在铁芯柱

上，为便于绝缘，一般低压绕组靠近铁芯。同心式绕组结构简单，制造方便，国产电力变压器均采用这种结构。交叠式绕组制成饼形，高、低压绕组上下交叠放置，主要用于电焊、电炉等变压器中。

变压器运行时因有铜损和铁损而发热，为了防止变压器因温度过高而烧坏，必须采取冷却散热措施。按冷却方式，变压器可分为自冷式和油冷式两种。小型变压器多采用自冷式，即在空气中自然冷却；容量较大的变压器多采用油冷式，即把变压器的铁芯和绕组全部浸在油箱中，油箱中的变压器油（矿物油）除了使变压器冷却外，还是很好的绝缘材料。为了容易散热，常采用波形壁来增加散热面。大型电力变压器常在箱壁上焊有散热管，不但增加散热面，而且使油经过管子循环流动，加强油的对流作用以促进变压器的冷却。

变压器从电源输入电能的绕组称为原绕组（或称为初级绕组，一次绕组）；向负载输出电能的绕组称为副绕组（或称为次级绕组，二次绕组）。电路图中表示单相变压器的符号如图 5-18 所示。

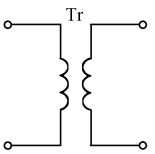


图 5-18　变压器的表示符号

3. 变压器的工作原理

（1）变压器的空载运行

变压器空载运行就是原绕组加额定电压而副绕组开路（不接负载）时的工作情况。例如，某用户的全部用电设备停止工作时，专给此用户供电的变压器就处于空载运行状态。

图 5-19 表示单相变压器空载运行。为了便于分析，将匝数为 N_1 的原绕组和匝数为 N_2 的副绕组分别画在闭合铁芯的两个柱上。

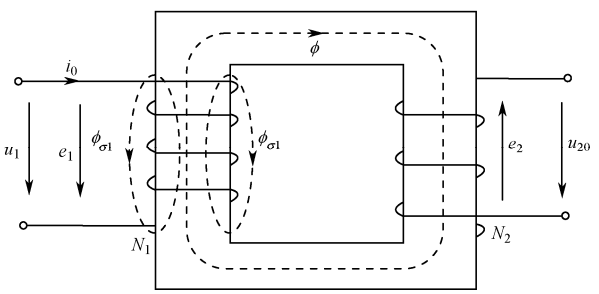


图 5-19　单相变压器的空载运行原理图

原绕组两端加上交流电压 u_1 时，便有交变电流 i_0 通过原绕组，i_0 称为空载电流。大、中型变压器的空载电流约为原边额定电流的 3%～8%。变压器空载时原绕组近似为纯电感电路，故 i_0 较 u_1 滞后 90°，此时原绕组的交变磁动势为 i_0N_1，它产生交变磁通，因为铁芯的磁导率比空气（或油）的大得多，绝大部分磁通通过铁芯磁路交链着原、副绕组，称为主磁通或工作磁通，记为 ϕ；还有少量磁通穿出铁芯沿着原绕组外侧通过空气或油而闭合，这些磁通只与原绕组交链，称为漏磁通，记为 ϕ_{s1}，漏磁通一般都很小，为了使问题简化，可以略去不计。

根据电磁感应定律，交变的主磁通 ϕ 在原、副绕组中分别感应出电动势 e_1 与 e_2 有

$$\begin{cases} e_1 = -N_1 \dfrac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} \\ e_2 = -N_2 \dfrac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{5.15}$$

若外加电压 u_1 按正弦变化，则 i_0 与 Φ 也都按正弦变化。设 ϕ 的初相为零，即 $\phi=\Phi_m\sin\omega t$，式中，Φ_m 为主磁通的幅值。将 ϕ 代入式（5.15）中得：

$$\begin{cases} e_1=-N_1\dfrac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}=-N_1\dfrac{\mathrm{d}\Phi_m\sin\omega t}{\mathrm{d}t}=-N_1\Phi_m\omega\cos\omega t=E_{1m}\sin(\omega t-\dfrac{\pi}{2}) \\ e_2=-N_2\dfrac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}=-N_2\dfrac{\mathrm{d}\Phi_m\sin\omega t}{\mathrm{d}t}=-N_2\Phi_m\omega\cos\omega t=E_{2m}\sin(\omega t-\dfrac{\pi}{2}) \end{cases} \tag{5.16}$$

可见 e_1 与 e_2 的相位都比 ϕ 滞后 $\dfrac{\pi}{2}$；因为 i_0 与产生的磁通 ϕ 是同相的，而 i_0 滞后外加电压 $u_1\dfrac{\pi}{2}$，所以 e_1 与 e_2 都与外加电压 u_1 反相。

由式（5.16）求得 e_1 与 e_2 的有效值分别为：

$$\begin{cases} E_1=\dfrac{1}{\sqrt{2}}E_{1m}=\dfrac{1}{\sqrt{2}}N_1\Phi_m\omega=4.44fN_1\Phi_m \\ E_2=\dfrac{1}{\sqrt{2}}E_{2m}=\dfrac{1}{\sqrt{2}}N_2\Phi_m\omega=4.44fN_2\Phi_m \end{cases} \tag{5.17}$$

式中，$N_1\Phi_m\omega=2\pi fN_1\Phi_m=E_{1m}$；$N_2\Phi_m\omega=2\pi fN_2\Phi_m=E_{2m}$。

由此可得：

$$\frac{E_1}{E_2}=\frac{4.44fN_1\Phi_m}{4.44fN_2\Phi_m}=\frac{N_1}{N_2} \tag{5.18}$$

即原、副绕组中的感应电动势之比等于原、副绕组匝数之比。

由于变压器的空载电流 I_0 很小，原绕组中的电压降可略去不计，故原绕组的感应电动势 E_1 近似地与外加电压 U_1 相平衡，即 $U_1\approx E_1$。而副绕组是开路的，其端电压 U_{20} 就等于感应电动势 E_2，即 $U_{20}=E_2$。

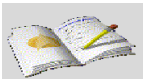
于是有：

$$\frac{U_1}{U_{20}}\approx\frac{E_1}{E_2}=\frac{N_1}{N_2}=k \tag{5.19}$$

式（5.19）说明，变压器空载时，原、副绕组端电压之比近似等于电动势之比（即匝数之比），这个比值 k 称为变压比，简称变比。

式（5.19）可写成：$U_1\approx kU_{20}$。当 $k>1$，则 $U_{20}<U_1$，是降压变压器；若 $k<1$，则 $U_{20}>U_1$，是升压变压器。

一般地，变压器的高压绕组总有几个抽头，以便在运行中随着负载的变动或外加电压 U_1 稍有变动时，用来改变高压绕组匝数，从而调整低压绕组的输出电压。通常调整范围为额定电压的±5%。



应用举例 —— 练一练

例 5.2 有一台单相降压变压器，原绕组接到 6600V 的交流电源上，副绕组电压为 220V，试求其变比。若原绕组匝数 N_1=3300 匝，试求副绕匝数 N_2。若电源电压减小到 6000V，为使副绕组电压保持不变，试问原绕组匝数应调整到多少？

解　变比为：$k=\frac{N_1}{N_2}\approx\frac{U_1}{U_{20}}=\frac{6600}{220}=30$

副绕组匝数为：$N_2=\frac{N_1}{k}=\frac{3300}{30}=110$（匝）

若U_1'=6000V，U_{20}不变，则原绕组匝数应调整为：$N_1'=N_2\frac{U_1'}{U_{20}}=110\times\frac{6000}{220}=3000$(匝)

（2）变压器负载运行

变压器的负载运行是指原绕组加额定电压，副绕组与负载相接通时的运行状态，如图 5-20 所示。这时副边电路中有了电流 i_2，它的大小由副绕组电动势 E_2 和副边电路的总阻抗来决定。

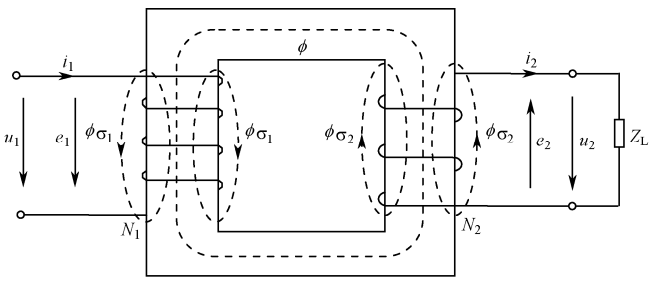


图 5-20　单相变压器的负载运行原理图

因为变压器原绕组的电阻很小，它的电阻电压降可忽略不计；实际上，即使变压器满载，原绕组的电压降也只有额定电压 U_{1N} 的 2%左右，所以变压器负载时仍可近似地认为 U_1 等于 E_1。由式（5.17）可得：

$$U_1\approx 4.44fN_1\Phi_m$$

上式是反映变压器基本原理的重要公式，它说明，不论是空载还是负载运行，只要加在变压器原绕组的电压 U_1 及其频率 f 都保持一定，铁芯中工作磁通的幅值 Φ_m 就基本上保持不变，那么，根据磁路欧姆定律，铁芯磁路中的磁动势也应基本不变。

空载时，铁芯磁路中的磁通是由原边磁动势 i_0N_1 产生和决定的。设负载时原、副边电流分别为 i_1 与 i_2，则此时铁芯中的磁通是由原、副边的磁动势共同产生和决定的。它们都是正弦量，可用相量表示。前面说过，铁芯磁路中的磁动势基本不变，所以负载时的合成磁动势应近似等于空载时的磁动势，即

$$\dot{I}_1N_1+\dot{I}_2N_2=\dot{I}_0N_1 \qquad (5.20)$$

式（5.20）称为变压器负载运行时的磁动势平衡方程，此式也可写成：

$$\dot{I}_1N_1=\dot{I}_0N_1+(-\dot{I}_2N_2)$$

上式表明，负载时原绕组的电流建立的磁动势 $\dot{I}_1N_1$ 可分为两部分：其一是 $\dot{I}_0N_1$，用来产生主磁通 Φ_m；其二是 $-\dot{I}_2N_2$，用来抵偿副绕组电流所建立的磁动势 $\dot{I}_2N_2$，从而保持 Φ_m 基本不变。

当变压器接近满载时，I_0N_1 远小于 I_1N_1，即可认为 $I_0N_1\approx 0$，于是有：

$$\dot{I}_1N_1\approx-\dot{I}_2N_2$$

说明 $\dot{I}_1N_1$ 与 $\dot{I}_2N_2$ 近似相等而且反相。若只考虑量值关系，则

$$I_1N_1\approx I_2N_2$$

或

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{N_2}{N_1}=\frac{1}{k} \tag{5.21}$$

式（5.21）表明，变压器接近满载时，原、副绕组的电流近似地与绕组匝数成反比，即变压器有变流作用。应当指出，式（5.21）只适用于满载或重载的运行状态，而不适用于轻载的运行状态。

由以上分析可知，变压器负载加大（即 I_2 增加）时，原边电流 I_1 必然相应增加，电流能量经过铁芯中磁通的媒介作用，从原边电路传递到副边电路。

对于用户来说，变压器的副绕组相当于电源，在原绕组外加电压不变的条件下，变压器的负载电流 I_2 增大时，副绕组的内部电压降也增大，副绕组的端电压 U_2 将随负载电流的变化而变化，这种特性称为变压器的外特性，对于感性负载，可用图 5-21 所示的曲线表示。现代电力变压器从空载到满载，副绕组的电压变化约为额定电压的 4%~6%（称为电压变化率）。

变压器除有变压作用和变流作用之外，还可用来实现阻抗的变换。设在变压器的副边接入阻抗为 Z_L，那么在原边看，这个阻抗值相当于多少呢？由图 5-22 可知，从原绕组输入端看进去的输入阻抗值 $|Z'_L|$ 为：

$$|Z'_L|=\frac{U_1}{I_1}=\frac{kU_2}{k^{-1}I_2}=k^2|Z_L| \tag{5.22}$$

式（5.22）说明，变压器副边的负载阻抗值 $|Z_L|$ 反映到原边的阻抗值 $|Z'_L|$ 近似为 $|Z_L|$ 的 k^2 倍，起到了阻抗变换作用。图 5-22 是表示这种变换作用的等效电路图。

例如，把一个 8Ω的负载电阻接到 k=3 的变压器副边，折算到原边就是 $R'\approx 3^2\times 8=72\Omega$。可见，选用不同的变比，就可把负载阻抗变换成为等效二端网络所需要的阻抗值，使负载获得最大功率，这种做法称为阻抗匹配，在广播设备中常用到，该变压器称为输出变压器。

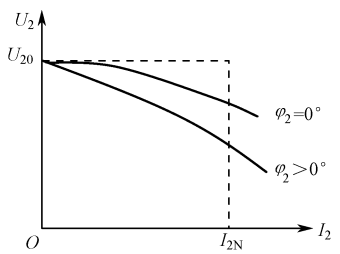


图 5-21　变压器的外特性曲线

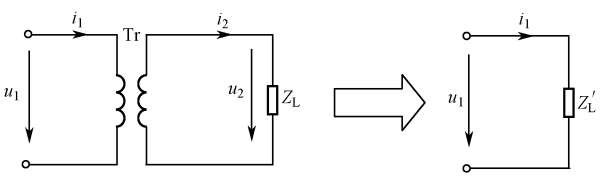


图 5-22　变压器阻抗变换等效电路



应用举例 —— 练一练

例 5.3　有一台降压变压器，原绕组电压为 220V，副绕组电压为 110V，原绕组为 2200 匝，若副绕组接入阻抗为10Ω的阻抗，问变压器的变比；副绕组匝数；原、副绕组中电流各为多少？

解　变压器变比为：$k=\frac{U_1}{U_2}=\frac{220}{110}=2$

副绕组匝数为：$N_2=\frac{N_1U_2}{U_1}=\frac{2200\times 110}{220}=1100$（匝）

副绕组电流为：$I_2=\dfrac{U_2}{|Z_L|}=\dfrac{110}{10}=11$（A）

原绕组电流为：$I_1=\dfrac{N_2}{N_1}I_2=\dfrac{1100}{2200}\times 11=5.5$（A）

4. 变压器的功率和效率

变压器原绕组的额定电压 U_{1N} 是设计时按照变压器的绝缘强度和容许发热规定的原绕组上应加的电压值；副绕组额定电压 U_{2N} 是原边加额定电压而变压器空载时副绕组端的电压值。变压器的额定电流 I_{1N}、I_{2N} 是按照变压器容许发热规定的原、副绕组中能长期允许通过的最大电流值。实际运用中不得超过各项额定值，否则由于发热过多或绝缘破坏而使变压器受到损害。

副绕组的额定电压与额定电流的乘积 $U_{2N}I_{2N}$ 称为变压器的额定容量 S_N，也就是变压器的额定视在功率，以 kV・A 为单位。

变压器实际输出的有功功率 P_2 不仅决定于副边的实际电压 U_2 与实际电流 I_2，而且还与负载的功率因数 $\cos\varphi_2$ 有关，即 $P_2=U_2I_2\cos\varphi_2$，其中 φ_2 为 u_2 与 i_2 的相位差。

变压器输入功率决定于它的输出功率。输入的有功功率为：$P_1=U_1I_1\cos\varphi_1$。

变压器输入功率与输出功率之差（P_1-P_2）是变压器本身消耗的功率，称为变压器的功率损耗，简称损耗，它包括以下两部分：

铜损耗 P_{Cu}：由于原、副绕组具有电阻 r_1、r_2，当电流 I_1、I_2 通过时，有一部分电能变成热能，其值为：$P_{Cu}=r_1I_1^2+r_2I_2^2$。铜损与电流有关，随负载而变化，因而也称可变损耗。

铁损耗 P_{Fe}：它是铁芯中的涡流损耗 P_e 与磁滞损耗 P_h 之和，即 $P_{Fe}=P_e+P_h$。频率一定时，铁损与铁芯中交变磁通的幅值 Φ_m 有关。而当电源电压 U_1 一定时，Φ_m 基本不变，因而铁损耗与变压器的负载大小无关。所以铁损耗也称为固定损耗。

输出功率和输入功率之比就是变压器的效率，记为 η，即

$$\eta=\frac{P_2}{P_1}\times 100\%=\frac{P_2}{P_2+P_{Cu}+P_{Fe}}\times 100\% \tag{5.23}$$

变压器没有转动部分，也就没有机械摩擦损耗，因此它的效率很高，大容量变压器最高效率可达 98%~99%。

5.2.2　三相变压器的认知

1. 三相变压器的结构和工作原理

对于三相电源进行电压变换，可用三台单相变压器组成的三相变压器组，或用一台三相变压器来完成。

三相变压器的铁芯有三个芯柱，每个芯柱上装有属于同一相的两个绕组，如图 5-23 所示。就每一相来说，其工作情况和单相变压器完全相同。

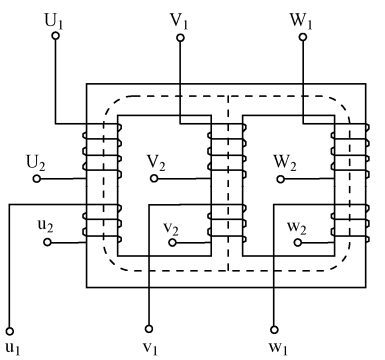


图 5-23　三相变压器

三相变压器或三个单相变压器的原绕组和副绕组都可

分别接成星形或三角形，实际上常用的接法有 Y，y（Y/Y）、Y，yn（Y/Y_0）和 Y，d（Y/△）连接，逗号前（或分子）表示高压线圈连接，逗号后（或分母）表示低压线圈连接，yn（Y_0）表示 Y 形连接有中线引出。

2. 三相变压器的铭牌和额定值

使用变压器时，必须掌握其铭牌上的技术数据。变压器铭牌上一般注明下列内容：

型号：表示变压器的结构、容量、冷却方式、电压等级等。例如，S9-1000/10，S 表示基本型号（如 S 表示三相），9 表示产品设计序号，1000 表示额定容量（kV·A），10 表示高压绕组电压等级（kV）。

额定电压：原边的额定电压是根据变压器的绝缘强度和允许发热条件而规定的正常工作电压值，副边额定电压是当原边绕组加上额定电压，而变压器分接开关置于额定分接头处时，副边绕组的空载电压值，单位为 V 或 kV。三相变压器的额定电压指线电压。

额定电流：是根据变压器容许发热条件所规定的绕组长期允许通过的最大电流值，单位为 A。三相变压器的额定电流指线电流。

额定容量：制造厂家规定的在额定使用条件下变压器输出视在功率的保证值，单位为 V·A 或 kV·A。

单相变压器的额定容量为：$S_N=U_{2N}I_{2N}\approx U_{1N}I_{1N}$。

三相变压器的额定容量为：$S_N=\sqrt{3}\,U_{2N}I_{2N}\approx\sqrt{3}\,U_{1N}I_{1N}$。

变压器的效率：变压器的输出功率与输入功率之比。变压器的功率损耗包括铁芯的铁损和绕组上的铜损耗两部分。由于变压器的功率损耗很小，所以变压器的效率一般都很高，对于大中型变压器的效率一般都在 95%以上。

额定频率：我国工业标准频率规定为 50Hz。

此外还有温升、阻抗电压、连接组别等参数，1000kV·A 以上的变压器铭牌上还标有空载电流、空载损耗及短路损耗等，这里不再一一介绍，读者可参看有关资料。

5.2.3 其他用途变压器的认知

1. 自耦变压器

普通双绕组变压器原、副绕组之间仅有磁的耦合，并无电的直接联系。自耦变压器只有一个绕组，如图 5-24 所示，即原、副绕组共用一部分绕组，所以自耦变压器原、副绕组之间除有磁的耦合外，又有电的直接联系。实质上自耦变压器就是利用一个绕组抽头的办法来实现改变电压的一种变压器。

以图 5-24 所示的自耦变压器为例，将匝数为 N_1 的原绕组与电源相接，其电压为 u_1；匝数为 N_2 副绕组（原绕组的一部分）接通负载，其电压为 u_2。自耦变压器的绕组也套在闭合铁芯的芯柱上，工作原理与普通变压器一样，原边和副边的电压、电流与匝数的关系仍为：

$$\frac{U_1}{U_2}\approx\frac{N_1}{N_2}=k$$

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{N_2}{N_1}=\frac{1}{k}$$

可见，适当选用匝数 N_2，副边就可得到所需的电压。

三相自耦变压器通常是接成星形的，如图 5-25 所示。

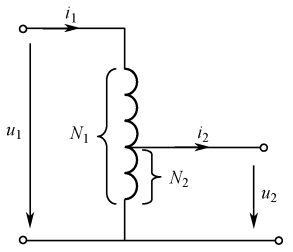


图 5-24　自耦变压器

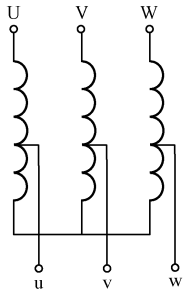
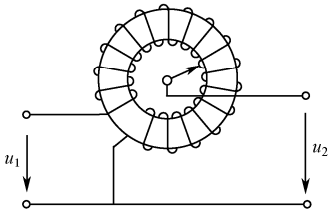
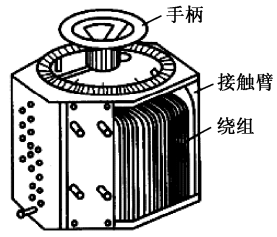


图 5-25　三相自耦变压器

自耦变压器的中间出线端，如果做成能沿着整个线圈滑动的活动触点，如图 5-26（a）所示，这种自耦变压器称为自耦调压器，其副边电压 U_2 可在 0 到稍大于 U_1 的范围内变动。图 5-26（b）所示是单相自耦调压器的外形。



（a）原理示意图



（b）外形图

图 5-26　单相自耦调压器

小型自耦变压器常用来启动交流电动机，在实验室和小型仪器上常作为调压设备，也可用在照明装置上来调节亮度。电力系统中也应用大型自耦变压器作为电力变压器。

因为自耦变压器的原、副绕组有直接的电的联系，一旦公共部分断开，高压将引入低压边，造成危险。所以自耦变压器的变比不宜过大，通常选择变比 $k<3$，而且不能用自耦变压器作为 36V 以下安全电压的供电电源。

2. 电焊变压器

交流弧焊机应用很广。电焊变压器是交流弧焊机的主要组成部分，它是一种双绕组变压器，在副绕组电路中串联一个可变电抗器。图 5-27 是它的原理图。对电焊变压器的要求是：空载时应有足够的引弧电压（约 60~75V），以保证电极间产生电弧。带负载时，副绕组电压应迅速下降，当焊条与工件间产生电弧并稳定燃烧时，约有 30V 的电压降，短路时（焊条与工件相碰瞬间），短路电流不能过大，以免损坏焊机。另外，为了适应不同的焊件和不同规格的焊条，焊接电流的大小要能够调节。

副绕组电路中串联有铁芯电抗器，调节其电抗就可调节焊接电流的大小。改变电抗器空气隙的长度就可改变它的电抗，空气隙增大，电抗器的感抗随之减小，电流就随之增大。

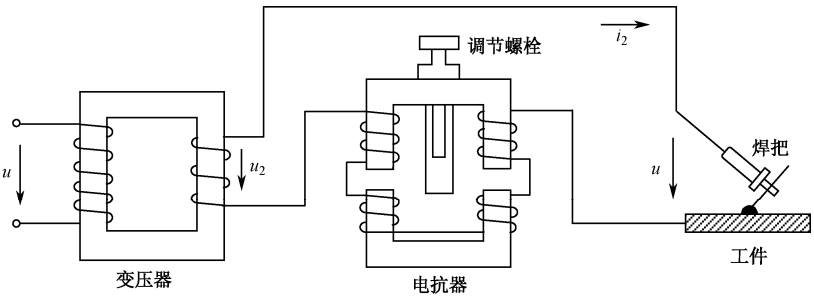


图 5-27　电焊变压器原理图

如图 5-27 所示，原、副绕组分别绕在两个铁芯柱上，使绕组有较大的漏磁通。漏磁通只与各绕组自身交链，它在绕组中产生的自感电动势起着减弱电流的作用，因此可用一个电抗来反映这种作用，称为漏电抗，它与绕组本身的电阻合称为漏阻抗。漏磁通越大，该绕组本身的漏电抗就越大，漏阻抗也就越大。对负载来说，副绕组相当于电源，那么副绕组本身的漏阻抗就相当于电源的内部阻抗，漏阻抗大就是电源的内阻抗大，会使变压器的外特性曲线变陡，即副边的端电压 U_2 将随电流 I_2 的增大而迅速下降，这样就满足了带负载时副边电压迅速下降以及短路瞬间短路电流不致过大的要求。

3. 仪用互感器

专供测量仪表、控制和保护设备用的变压器称为仪用互感器。仪用互感器有两种：电压互感器和电流互感器。利用互感器将待测的电压或电流按一定比率减小以便于测量；且将高压电路与测量仪表电路隔离，以保证安全。互感器实质上就是损耗低、变比精确的小型变压器。

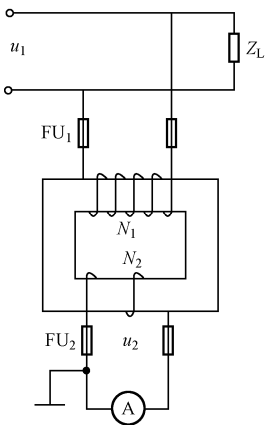


图 5-28　电压互感器原理图

电压互感器的原理图如图 5-28 所示。由图看到，高压电路与测量仪表电路只有磁的耦合而无电的直接连通。为防止互感器原、副绕组之间绝缘损坏时造成危险，铁芯以及副绕组的一端应当接地。

电压互感器的主要原理是根据式（5.19），即

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{N_1}{N_2}$$

为降低电压，要求 $N_1>N_2$，一般规定副边的额定电压为 100V。

电流互感器的原理图如图 5-29 所示。电流互感器的主要原理是根据式（5.21），即

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{N_2}{N_1}$$

为减小电流，要求 $N_1<N_2$，一般规定副边的额定电流为 5A。

使用互感器时，必须注意：由于电压互感器的副绕组电流很大，因此绝不允许短路；电流互感器的原绕组匝数很少，而副绕组匝数较多，这将在副绕组中产生很高的感应电动势，因此电流互感器的副绕组绝不允许开路。

便携式钳形电流表就是利用电流互感器原理制成的，图 5-30 是它的外形图和原理图，其

副绕组端接有电流表，铁芯由两块 U 形元件组成，用手柄能将铁芯张开与闭合。

测量电流时，不需断开待测电路，只需张开铁芯将待测的载流导线钳入（即图 5-30（a）中的 A、B 端），这根导线就成为互感器的原绕组，于是可从电流表直接读出待测电流值。

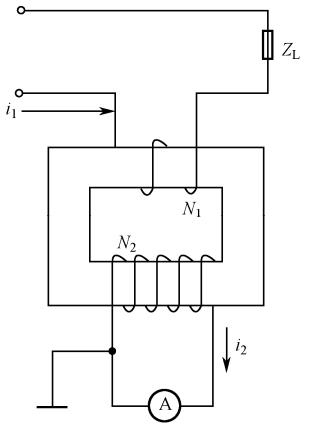


图 5-29　电流互感器原理图

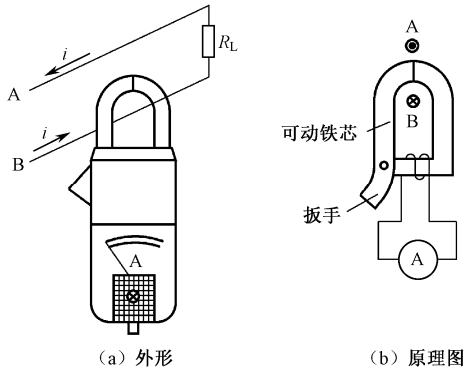


图 5-30　钳形电流表



实践操作 —— 做一做

小型变压器变换电压、电流和阻抗试验。按照图 5-31 所示电路接好线路，图中小型变压器为 220V/55V，负载选用三只 36V/25W 的灯泡，交流调压器为 0~250V 自耦调压器。 调节调压器使用单相变压器空载时的输出为 36V，然后分别在变压器的副边接入 1 只、2 只、3 只灯泡，测量单相变压器的输入电压和输出电压、输入电流和输出电流，将测量数据填入表 5-2 中。根据表中的数据计算$|Z_L|$、$|Z'_L|$值，分析变压器的阻抗变换作用。

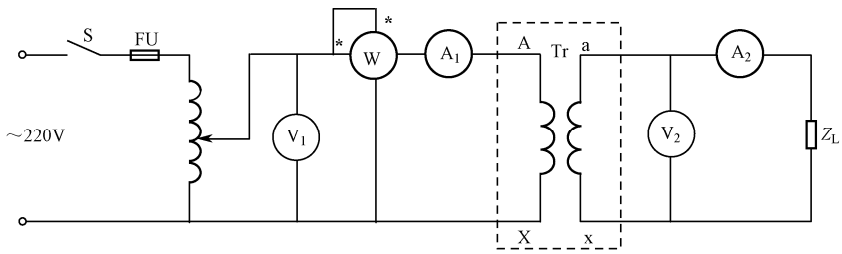


图 5-31　小型变压器变换电压、电流和阻抗的电路图

表 5-2　变压器电压变换、电流变换和阻抗变换作用

灯泡数	一次侧			二次侧		
	电压 U_1/V	电流 I_1/A	阻抗 $\|Z'_L\|$ /Ω	电压 U_2/V	电流 I_2/A	阻抗 $\|Z_L\|$ /Ω
1						
2						
3						



问题研讨 —— 想一想

（1）已知一台 220V/110V 的单相变压器，原绕组 400 匝、副绕组 200 匝，可否原绕组只绕两匝、副绕组只绕一匝？为什么？

（2）变压器空载运行且原绕组加额定电压时，为什么空载电流并不因为原绕组电阻很小而很大？

（3）自耦变压器的结构特点是什么？有哪些优、缺点？

（4）交流电压互感器和电流互感器使用时应注意什么问题？为什么？

（5）电焊变压器的外特性与普通变压器有什么不同？电焊变压器在结构上有什么特点？

（6）变压器的铭牌上标明 220V/36V、300VA，问下列哪一种规格的电灯能接在此变压器的副边中使用？为什么？

电灯规格：36V、500W；36V、60W；12V、60W；220V、25W。

任务 5.3　变压器的常见故障及检修方法



任务描述

在使用变压器时有时会发生故障。本任务学习变压器的常见故障的维修方法、变压器的使用及变压器的维护。



任务目标

了解变压器常见故障的维修方法、变压器的使用及变压器的维护。



任务实施



知识链接 —— 学一学

5.3.1　变压器的常见故障及检修方法

1. 引出线端头断裂

如果一次回路有电压而无电流，一般是一次线圈的端头断裂；若一次回路有较小的电流而二次回路既无电流也无电压，一般是二次线圈端头断裂。通常是由于线头折弯次数过多，或线头遇到猛拉，或焊接处霉断（焊剂残留过多），或引出线过细等原因所造成的。

如果断裂线头处在线圈的最外层，可掀开绝缘层，挑出线圈上的断头，焊上新的引出线，包好绝缘层即可；若断裂线端头处在线圈内层，一般无法修复，需要拆开重绕。

2. 线圈的匝间短路

存在匝间短路，短路处的温度会剧烈上升。如果短路发生在同层排列左右两匝或多匝之间，过热现象稍轻；若发生在上下层之间的两匝或多匝之间，过热现象就很严重。通常是由于线圈遭受外撞击，或漆包线绝缘老化等原因所造成的。

如果短路发生在线圈的最外层，可掀去绝缘层后，在短路处局部加热（指对浸过漆的线圈，可用电吹风加热），待漆膜软化后，用薄竹片轻轻挑起绝缘已破坏的导线，若线芯没有损伤，可插入绝缘纸，裹住后压平；若线芯已损伤，应剪断，去除已短路的一匝或多匝导线，两端焊接后垫妥绝缘纸，压平。用以上两种方法修复后均应涂上绝缘漆，吹干，再包上外层绝缘。如果故障发生在无骨架线圈两边沿口的上下层之间，一般也可按上述方法修复。若故障发生在线圈内部，一般无法修理，需拆开重绕。

3. 线圈对铁芯短路

存在这一故障，铁芯就会带电，这种故障在有骨架的线圈上较少出现，但在线圈的最外层会出现这一故障；对于无骨架的线圈，这种故障多数发生在线圈两边的沿口处，但在线圈最内层的四角处比较常出现，在最外层也会出现。其原因通常是由于线圈外形尺寸过大而铁芯窗口容纳不下，或因绝缘纸垫得不佳或遭到剧烈跌碰等所造成的。

修理方法可参照匝间短路的有关内容。

4. 铁芯噪声过大

铁芯噪声有电磁噪声和机械噪声两种。电磁噪声通常是由于设计时铁芯磁通密度选得过高，或变压器过载，或存在漏电故障等原因所造成的；机械噪声通常是由于铁芯没有压紧，在运行时硅钢片发生机械振动所造成的。

如果是电磁噪声，属于设计原因的，可换用质量较佳的同规格硅钢片；属于其他原因的应减轻负载或排除漏电故障。如果是机械噪声，应压紧铁芯。

5. 线圈漏电

线圈漏电的基本特征是铁芯带电和线圈温升增高，通常是由于线圈受潮或绝缘老化所引起的。若是受潮，只要烘干后故障即可排除；若是绝缘老化，严重的一般较难排除，轻度的可拆去外层包缠的绝缘层，烘干后重新浸漆。

6. 线圈过热

线圈过热通常是由于过载或漏电所引起的，或因设计不佳所致；若是局部过热，则是由于匝间短路所造成的。

7. 铁芯过热

铁芯过热通常是由于过载、设计不佳、硅钢片质量不佳或重新装配硅钢片时少插入片数

等原因所造成的。

8. 输出侧电压下降

输出侧电压下降通常是由于一次侧输入的电源电压不足（未达到额定值）、二次绕组存在匝间短路、对铁芯短路或漏电或过载等原因所造成的。

5.3.2 变压器的正确使用

1. 变压器的使用要求

电力变压器的额定容量（铭牌容量）是指它在规定的环境温度条件下，户外安装时，在规定的使用年限（20 年）内所能连续输出的最大视在功率（kV·A）。

（1）温度要求

根据 GB1094-85《电力变压器》规定，电力变压器正常使用的环境温度条件为最高气温+40℃，最高日平均气温+30℃，最高年平均气温+20℃，户外变压器最低气温–30℃，户内变压器最低温度为–5℃。油浸式变压器顶层油的温升，规定不得超过周围气温 55℃。如按规定的最高气温+40℃，则变压器顶层油温不得超过+95℃。

（2）变压器的使用年限

变压器的使用年限，主要取决于变压器绕组绝缘的老化速度，而绝缘的老化速度又取决于绕组最热点的温度。变压器的绕组导体和铁芯，一般可以长期经受较高的温升而不致损坏，但绕组长期受热时，其绝缘的弹性和机械强度会逐渐减弱，这就是绝缘的老化现象。绝缘老化严重时，就会变脆、裂纹和脱落。试验表明，在规定的环境温度条件下，如果变压器绕组最热点的温度一直维持 95℃，则变压器可持续安全运行 20 年；但如果变压器绕组温度升高到 120℃时，则变压器只能运行 2 年。这说明其绕组温度对变压器的使用寿命有着极大的影响，而绕组的温度又与绕组通过的电流大小有直接的关系。

2. 变压器容量选择

变压器的容量如果选得过大，不仅造成电能浪费，而且影响电网电压；如果选得过小，造成用电设备电力不足，直至变压器烧毁。

（1）只装有一台主变压器的容量选择。主变压器的额定容量 S_{NT} 应满足全部用电设备总的计算负荷 S_{30} 的需要，即

$$S_{NT} \geqslant S_{30} \tag{5.24}$$

（2）装有两台主变压器的容量选择。每台主变压器的额定容量 S_{NT}，应同时满足以下两个条件：

① 任一台变压器单独运行时，应能满足不小于总计算负荷 60%的需要，即

$$S_{NT} \geqslant 0.6S_{30} \tag{5.25}$$

② 任一台变压器单独运行时，应能满足全部一、二级负荷 $S_{30(\text{I}+\text{II})}$ 的需要，即

$$S_{NT} \geqslant S_{30(\text{I}+\text{II})} \tag{5.26}$$

（3）单台主变压器（低压为 0.4kV）的容量上限。低压为 0.4kV 的单台主变压器容量，一

般不宜大于 1250kV・A。这一方面是受现在通用的低压断路器的断流能力及短路稳定度要求的限制；另一方面也是考虑到可以使变压器更接近于负荷中心，以减少低压配电系统的电能损耗和电压损耗。

此外，主变压器容量的确定，应适当考虑发展。主变压器的台数和容量的最后确定，应结合变电所主结线方案的选择，择优而定。

5.3.3　变压器的维护与检查

防止事故的有效办法，就是经常做好维护工作和检查工作，预防发生事故。下面以油浸式电力变压器为例。

1. 变压器运行中应检查的项目

变压器运行中检查的项目有：变压器“嗡嗡”的声音是否加大，有无新的音调产生；有无漏油、渗油现象，油位表所示的油位和油色是否正常；变压器的温度；变压器套管是否清洁，有无破损、裂纹和放电痕迹；变压器外壳的接地情况是否良好；油枕的集泥器内有无水和脏物；各种标示牌和相色的涂漆是否清楚；各部分的螺栓有无松动，变压器的引线接头处有无松动或腐蚀，是否有导电不良等现象。

2. 雷雨季节之前的检修

在雷雨季节之前应检修的项目有：用 1000V 摇表测量绕组的绝缘电阻 1min 数值，绝缘电阻应大于或等于 60MΩ；检查引出线接头及铜、铝接头情况是否合格，若有接触不良或腐蚀，应进行修理；检查套管有无裂痕和放电痕迹，并清扫积污；清扫油箱、散热管，必要时应除锈涂漆；检查接地线是否完整，应没有腐蚀并可靠地连接；检查油位表是否正常，变压器如缺油应及时补充；用万用表测量每一分接头绕组的直流电阻，以检查接触情况和回路的完整性。

3. 变压器大修

电力变压器正常情况下，一般每 10 年才需大修一次。

（1）变压器的大修项目

变压器大修项目有：拆开变压器顶盖，取出芯子；检修铁芯、绕组、引出线；检修顶盖、油枕、防爆管、散热管、油阀、套管；清扫外壳，必要时进行油漆；滤油或换油；测量绕组绝缘电阻，必要时干燥绝缘；装配变压器；按照“电气设备交接和预防性试验规程”的规定，对变压器进行测量和试验。

（2）变压器大修后的试验

① 变压器油的耐压试验。耐压试验就是确定变压器油的击穿电压，同时根据油样外貌检查有无机械混合物、水分和游离碳。凡经检修后的变压器，在出厂前必须进行油压试验。要求在采用打泵压力试漏时，压力为 0.5～0.8MPa，持续时间为 12h，以不漏不渗为合格。在采用油柱压力试漏时，油柱高度不低于 2.5m，持续时间为 24h，也以不漏不渗为合格。若发现渗漏现象应进行修复，修复后，还必须进行油压试验，直到不渗不漏为止。

② 变压器油的检化试验。新油和运行中的变压器油都需要检验。按变压器运行规程规定，

运行中的变压器油一年至少需要取样检验一次，其中 3～10kV 变压器的油只做耐压试验即可，20～35kV 变压器的油除做耐压试验外，还要做油的检化试验。

检化试验是确定变压器油的闪点、酸价、水分引起的反应和电气绝缘强度。同时根据油的外表确定油内有无机械混杂物、水分和游离碳。变压器油的检化试验比较复杂，一般由化验单位专业人员进行。油的耐压试验比较简单，一般电气技术人员均可掌握。

变压器油的检化试验就是提取油样进行化验油的酸度、水分、闪点，并对变压器油的油质进行检查。

变压器油的颜色。普通新油是淡黄色，运行后呈浅红色。呈深暗色表明油质变坏不能使用。

透明度。将变压器油盛在直径 30～40mm 的玻璃试管中看，应当是透明的（在–5°C 以上时），如果透明度差，表示油中存在机械杂质和游离碳。

荧光。如果迎着光线看一个盛着新鲜变压器油的玻璃杯，在两侧呈现出乳绿或蓝紫反射光线，称之为荧光。使用过的变压器油，其荧光很微弱或完全没有荧光，表示油中有杂质或分解物。

气味。好变压器油应当没有气味，或只有一点煤油味，如油有焦味，表示油不干燥；如有酸味，表示油已严重老化。

③ 变压器绝缘电阻的检测项目。绕组和铁芯夹紧螺栓的绝缘电阻（采用 1000V 的摇表）；测量变压比；对变压器主绝缘和瓷套管做交流耐压试验；空载时做绕组层间绝缘的耐压试验；测定绕组的直流电阻。

④ 变压器大修后通电试验。测量空载电流和损失；测量短路损失和短路电压；确定绕组接线的组别；变压器做定相试验。

（3）验收

变压器大修后，验收时须检查的项目有：实际检修项目和检修质量；大修后各项试验记录；大修技术报告书。



问题研讨 —— 想一想

（1）查阅资料，学习变压器常见故障有哪些？如何进行维修？

（2）变压器运行中的维护检查工作有哪些项目？

（3）变压器大修有哪些项目？变压器常出现哪些故障？变压器大修后应做哪些试验？

（4）如何正确使用变压器？如何选择变压器的容量？

项目小结

1. 磁路是磁通集中通过的路径，由于铁磁性物质具有高导磁性，所以很多电气设备均用铁磁材料构成磁路。磁路与电路有对偶性。磁通—电流、磁通势—电动势，磁阻—电阻一一对应，甚至磁路欧姆定律—电路欧姆定律也相对应。但由于铁磁性物质的磁阻不是常数，故磁路欧姆定律常用于定性分析。

2. 互感

一个线圈通过电流所产生的磁通穿过另一个线圈的现象，称为互感现象或磁耦合。

互感系数为：$M=\dfrac{\Psi_{21}}{i_1}=\dfrac{\Psi_{12}}{i_2}$

耦合系数 k：表示两个线圈耦合的紧密程度，$k=\dfrac{M}{\sqrt{L_1L_2}}$，$0\leqslant k\leqslant 1$。

互感电压：选择互感电压和产生它的电流的参考方向对同极性端一致时，有：

$$u_{12}=M\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t},\quad u_{21}=M\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}$$

对于正弦交流电路有：

$$\dot{U}_{21}=\mathrm{j}\omega M\dot{I}_1=\mathrm{j}X_{\mathrm{M}}\dot{I}_1,\quad \dot{U}_{12}=\mathrm{j}\omega M\dot{I}_2=\mathrm{j}X_{\mathrm{M}}\dot{I}_2$$

3. 同极性端

电流分别从同极性端流入，磁耦合线圈中的自感磁通和互感磁通相助。用同极性端来表示线圈的绕向。

4. 两互感线圈顺向串联时，其等效电感为：$L_{\mathrm{F}}=L_1+L_2+2M$；反向串联时，等效电感为：$L_{\mathrm{R}}=L_1+L_2-2M$。互感系数为：$M=\dfrac{L_{\mathrm{F}}-L_{\mathrm{R}}}{4}$。

两线圈同侧并联时，等效电感为：$L=\dfrac{L_1L_2-M^2}{L_1+L_2-2M}$；异侧并联时，等效电感为：$L=\dfrac{L_1L_2-M^2}{L_1+L_2+2M}$。

5. 变压器是根据电磁感应原理制成的静止电气设备，它主要由用硅钢片叠成的铁芯和套在铁芯柱上的绕组构成。只要原、副绕组匝数不等，变压器就具有变电压、变电流和变换阻抗的功能，这些物理量与匝数的关系如下：

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{N_1}{N_2}=k,\quad \frac{I_1}{I_2}=\frac{N_2}{N_1}=\frac{1}{k},\quad \left|Z'_{\mathrm{L}}\right|=\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2\left|Z_{\mathrm{L}}\right|=k^2\left|Z_{\mathrm{L}}\right|$$

6. 常用的变压器有三相变压器、自耦变压器、仪用互感器、电焊变压器，其基本结构、工作原理与普通变压器基本相同，但又各有特点。

7. 了解变压器的故障主要有铁芯故障和绕组故障，掌握变压器的正确使用、容量选择、维护与检查常见的故障、检测方法以及变压器大修项目与试验要求。

习　　题

5.1　已知两耦合线圈的电感分别为：L_1=0.1H，L_2=0.4H，求：（1）k=0.2 时，M=？（2）M=0.2H，k=？

5.2　已知两耦合线圈的 L_1=5mH，L_2=4mH，求（1）k=0.5 时，M=？（2）M=3mH，k=？（3）若两线圈是全耦合，求 M=？

5.3　两线圈的自感分别为 0.8H 和 0.7H，互感为 0.5H，电阻不计。试求当电源电压一定

时，两线圈反向串联时的电流与顺向串联时的电流之比。

5.4　一个可变电感器由一个固定线圈，与直径较小可以固定线圈中间旋转的可动线圈串联而成，当中间线圈旋转时，可由顺向串联逐渐变为反向串联，获得连续变动的电感。现得等效电感的最大值为 626.5mH，最小为 106.5mH。求互感 M 的变动范围。

5.5　有两个有磁耦合的线圈，外加电压为 U=220V、f=50Hz 的正弦电压。顺向串联时测得电流为 2.5A，功率为 62.5W；反向串联时测得功率为 250W。求互感 M。

5.6　接在 220V 交流电源上的单相变压器，其副绕组电压为 110V，若副绕组匝数 350 匝，求（1）变压比；（2）原绕组匝数 N_1。

5.7　已知单相变压器的容量是 1.5kV•A，电压是 220/110V。试求原、副绕组的额定电流。如果副绕组电流是 13A，原绕组电流约为多少？

5.8　一台 220/36V 的行灯变压器，已知原绕组匝数 N_1=1100 匝，试求副绕组匝数？若在副绕组接一盏 36V、100W 的白炽灯，问原绕组电流为多少（忽略空载电流和漏阻抗压降）？

6.9　一台晶体管收音机的输出端要求最佳负载阻抗值为 450Ω，即可输出最大功率。现负载是阻抗为 8Ω的扬声器，问：输出变压器应采用多大的变比？

5.10　如图 5-32 所示，变压器副绕组电路中的负载为 R_L=8Ω的扬声器，已知信号源电压 U_s=15V，内阻 R_0=100Ω，变压器原绕组的匝数 N_1=200 匝，副绕组的匝数 N_2=80 匝。（1）试求扬声器获得的功率和信号源发出的功率；（2）如要使扬声器获得最大功率，即达到阻抗匹配，试求变压器的变压比及扬声器获得的功率。

5.11　已知某收音机输出变压器的 N_1=600 匝，N_2=300 匝，原接阻抗为 20Ω的扬声器，现要改接成 5Ω的扬声器，求变压器的副边匝数 N_2。

5.12　图 5-33 所示的为副方有三个绕组的电源变压器，试问该变压器能输出几种电压？

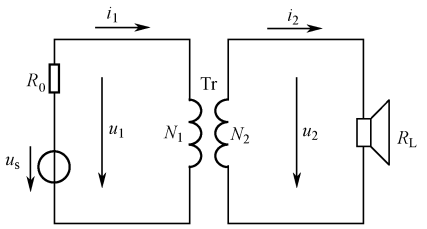


图 5-32

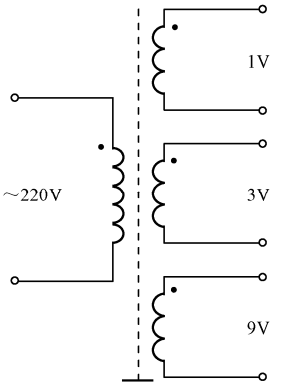


图 5-33

5.13　有一台 Y/△连接的三相变压器，各相电压的变比 k=2，如原方线电压为 380V，问副方线电压是多少？又如副边线电流为 173A 时，问原方电流是多少？

5.14　有一台三相变压器，额定容量 S_N=5000kV•A，额定电压 U_{1N}/U_{2N}=10/6.3kV，采用 Y/△连接，试求：（1）一、二次侧的额定电流；（2）一、二次侧的额定相电压和相电流。

项目 6　交流电动机的认知及电气控制线路的装配



1. 三相异步电动机的结构、转动原理、运行特性；
2. 单相异步电动机的结构和工作原理；
3. 常用低压电器的结构、用途和动作过程；
4. 三相异步电动机基本控制电路分析与安装。



1. 认识三相异步电动机的结构、明确其铭牌数据的意义；

2. 理解三相异步电动机的转动原理，机械特性曲线，并能正确使用几个重要的转矩公式进行计算；

3. 理解三相异步电动机的启动问题，掌握三相异步电动机的启动、调速及制动的方法及原理；

4. 认识单相异步电动机的结构，熟悉单相异步电动机的工作原理；

5. 了解常用低压电器的结构、用途，熟悉常用低压电器的动作过程；

6. 能够分析三相鼠笼式电动机直接启动、正反转、降压启动等控制线路。



1. 能正确地把三相异步电动机、单相异步电动机接入电源，并能进行测试；

2. 会进行电气控制原理图的识读，能结合控制电路的器件进行规范、合理的布局，并能正确绘制电气控制原理图；

3. 能规范地进行电气控制线路的安装、调试，并能将所学典型控制环节运用于实际控制电路中。



1. 理论联系实际，训练分析和解决问题的能力；

2. 提高学生的专业意识、培养高度的责任心和安全意识，遵章守纪、规范操作，使学生养成良好的科学态度和求是精神；

3. 锻炼信息、资料搜集与查找的能力。

任务 6.1　三相异步电动机的工作原理及特性

任务描述

三相异步电动机是把交流电能转换为机械能的一种动力机械。它的结构简单，制造、使用和维护简便，成本低廉，运行可靠，效率高，在工农业生产及日常生活中得到广泛应用。三相异步电动机被广泛用来驱动各种金属切削机床，起重机，中、小型鼓风机，水泵及纺织机械等。本任务学习三相异步电动机的结构、工作原理及转矩特性和机械特性。

任务目标

熟悉三相异步电动机的结构；理解三相异步电动机的铭牌数据的意义、工作原理、转矩特性和机械特性；能正确地把三相异步电动机接入三相电源。

任务实施

知识先导 —— 认一认

观察图 6-1 所示的三相异步电动机的外形图及主要零部件。

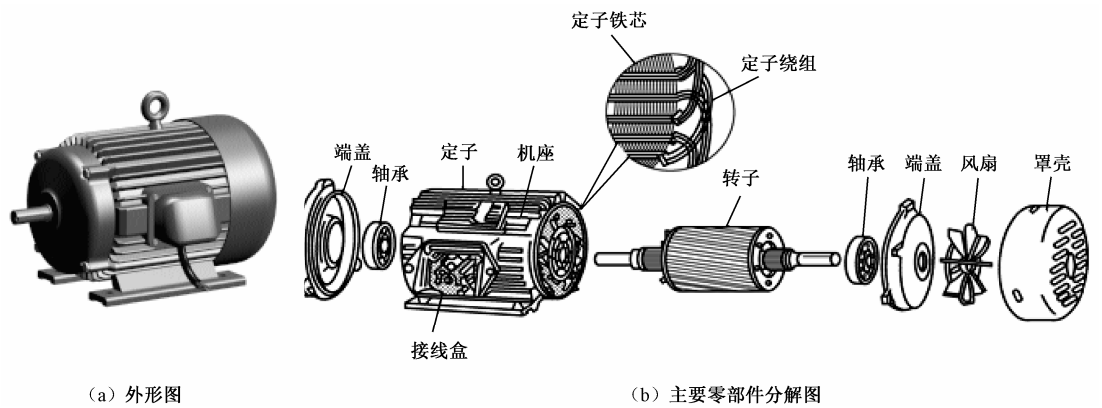


图 6-1　三相异步电动机

知识链接 —— 学一学

6.1.1　三相异步电动机的结构

三相异步电动机由定子和转子两个基本部分组成，转子装在定子内腔里，借助轴承被支撑在两个端盖上。为了保证转子能在定子内自由转动，定子和转子之间必须有一定的间隙，称为气隙。

1. 定子（静止部分）

三相异步电动机的定子是安装在铸铁或铸钢制成的机座内的由 0.5mm 厚的硅钢片叠成的筒形铁芯，片间绝缘以减少涡流损耗。铁芯内表面上分布与轴平行的槽，如图 6-2 和图 6-3 所示，槽内嵌有三相对称绕组。绕组是根据电机的磁极对数和槽数按照一定规则排列与连接的。

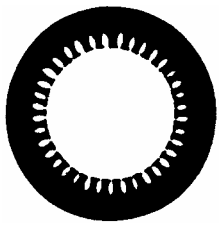


图 6-2　定子的硅钢片

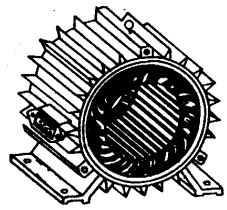
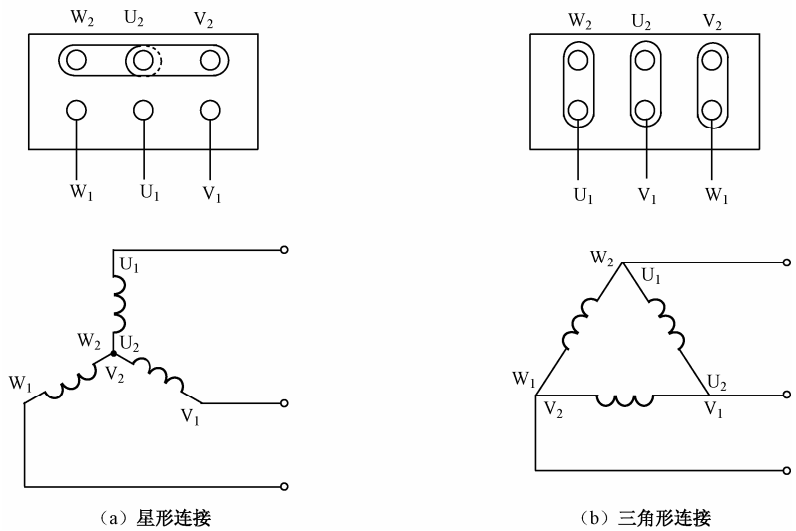


图 6-3　装有三相绕组的定子

定子绕组可以接成星形或三角形。为了便于改变接线，三相绕组的六根端线都接到定子外面的接线盒上。盒中接线柱的布置如图 6-4 所示，图 6-4（a）为定子绕组的星形（Y 形）接法；图 6-4（b）为定子绕组的三角形（△形）接法。



（a）星形连接　　（b）三角形连接

图 6-4　三相异步电动机的接线盒

目前我国生产的三相异步电动机，功率在 4kW 以下的定子绕组一般均采用星形接法；4kW

以上的一般采用三角形接法，以便于应用 Y-△降压启动。

2. 转子（旋转部分）

三相异步电动机的转子是由 0.5mm 厚的硅钢片（如图 6-5 所示）叠成的圆柱体，并固定在转子轴上，如图 6-6 所示。转子表面有均匀分布的槽，槽内放有导体。转子有两种形式：鼠笼式转子和绕线式转子。

鼠笼式转子的绕组由安放在槽内的裸导体构成，这些导体的两端分别焊接在两个端环上，因为它的形状像个松鼠笼子，如图 6-7 所示，所以称为鼠笼式转子。

目前 100kW 以下的异步电动机，转子槽内的导体、转子的两个端环以及风扇叶一起用铝铸成一个整体，如图 6-8 所示。具有鼠笼式转子的异步电动机称为鼠笼式异步电动机。

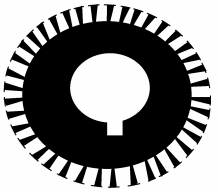


图 6-5　转子的硅钢片

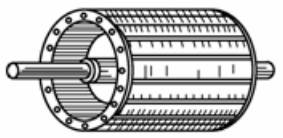


图 6-6　鼠笼式转子

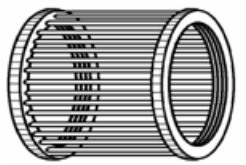


图 6-7　鼠笼式转子绕组

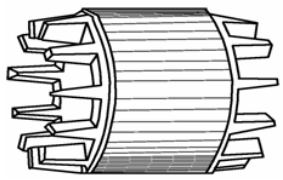


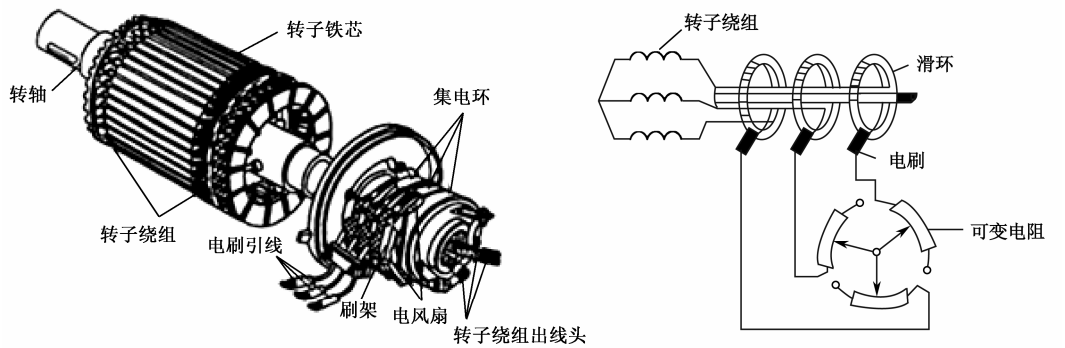
图 6-8　铸铝的鼠笼式转子

绕线式转子的绕组与定子绕组相似，也是三相对称绕组，通常接成星形，三根端线分别与三个铜制滑环连接，环与环以及环与轴之间都彼此绝缘，如图 6-9 所示。具有这种转子的异步电动机称为绕线式异步电机。

转轴由中碳钢制成，其两端由轴承支撑，它用来输出转矩。

3. 气隙

气隙是指异步电动机的定子铁芯内圆表面与转子铁芯外圆表面之间的间隙。异步电动机的气隙是均匀的。气隙大小对电动机的运行性能和参数影响较大，由于励磁电流由电网供给，气隙越大，磁路磁阻越大，励磁电流越大，而励磁电流属于无功电流，电动机的功率因数越低，效率越低。因此，异步电动机的气隙大小往往为机械条件所能允许达到的最小气隙，气隙过小，装配困难，容易出现扫堂。中、小型异步电动机的气隙一般为 0.2～1.5mm。



（a）外形图　　（b）串接电阻接线图

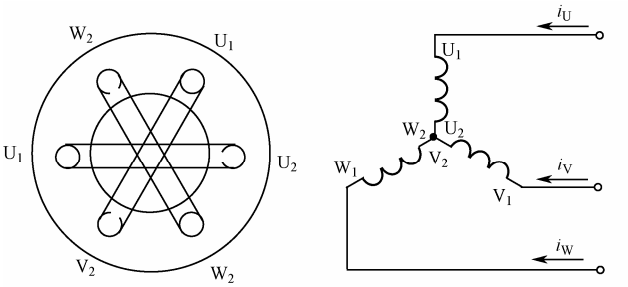
图 6-9　绕线式转子

6.1.2　三相异步电动机的运转原理及额定值

1. 旋转磁场的产生

（1）两极旋转磁场的产生

如图 6-10 所示，设有三只同样的线圈放置在定子槽内，彼此相隔 120°，组成了简单的定子三相对称绕组，以 U_1、V_1、W_1 表示绕组的始端，U_2、V_2、W_2 表示绕组的末端。当绕组接成 Y 形时，其末端 U_2、V_2、W_2 连成一个中点，始端 U_1、V_1、W_1 与电源相接。图 6-10（a）所示为对称三相绕组，图 6-10（b）所示为三相定子绕组 Y 形连接。三相定子绕组中通入三相对称电流，假设定子绕组中电流的正方向由线圈的始端流向末端，流过三相线圈的电流为三相对称电流 i_U、i_V、i_W，如图 6-11 所示。



（a）三相对称定子绕组　　（b）三相对称定子绕组的星形连接

图 6-10　三相定子绕组

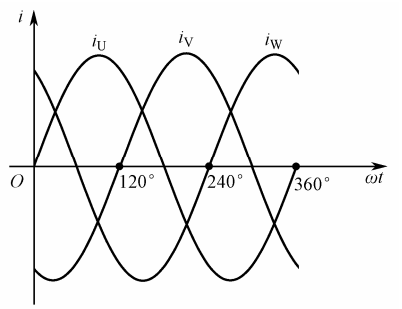
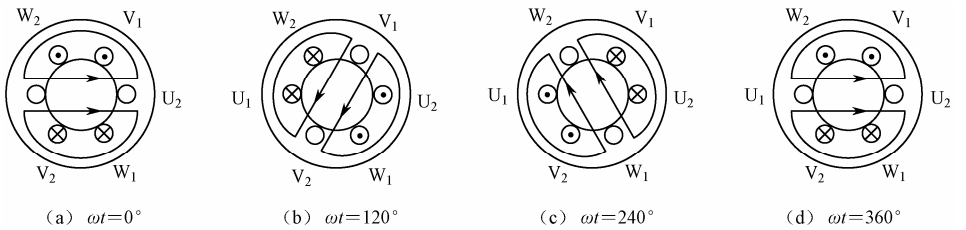


图 6-11　三相对称电流波形

由于电流随时间而变化，所以电流流过线圈产生的磁场分布情况也随时间而变化，几个瞬间的磁场如图 6-12 所示。



（a）ωt=0°　（b）ωt=120°　（c）ωt=240°　（d）ωt=360°

图 6-12　三相两极旋转磁场

当ωt=0° 瞬间，由图 6-11 看出，i_U=0，U 相没有电流流过，i_V 为负，表示电流由末端流向首端（即 V_2 端为⊗，V_1 为⊙）；i_W 为正，表示电流由首端流向末端（即 W_1 端为⊗，W_2 为⊙）。这时三相电流所产生的合磁场方向由“右手螺旋定则”判得为水平向右，如图 6-12（a）所示。

当ωt=120° 瞬间，由图 6-11 得，i_U 为正，i_V=0，i_W 为负，用同样方式可判得三相合成磁场沿相序方向旋转了 120°，如图 6-12（b）所示。

当ωt=240° 瞬间，由图 6-11 得，i_U 为负，i_V 为正 0，i_W=0，合成磁场又沿相序方向旋转了 120°，如图 6-12（c）所示。

当ωt=360° 瞬间，又转回到（1）的情况，如图 6-12（d）所示。

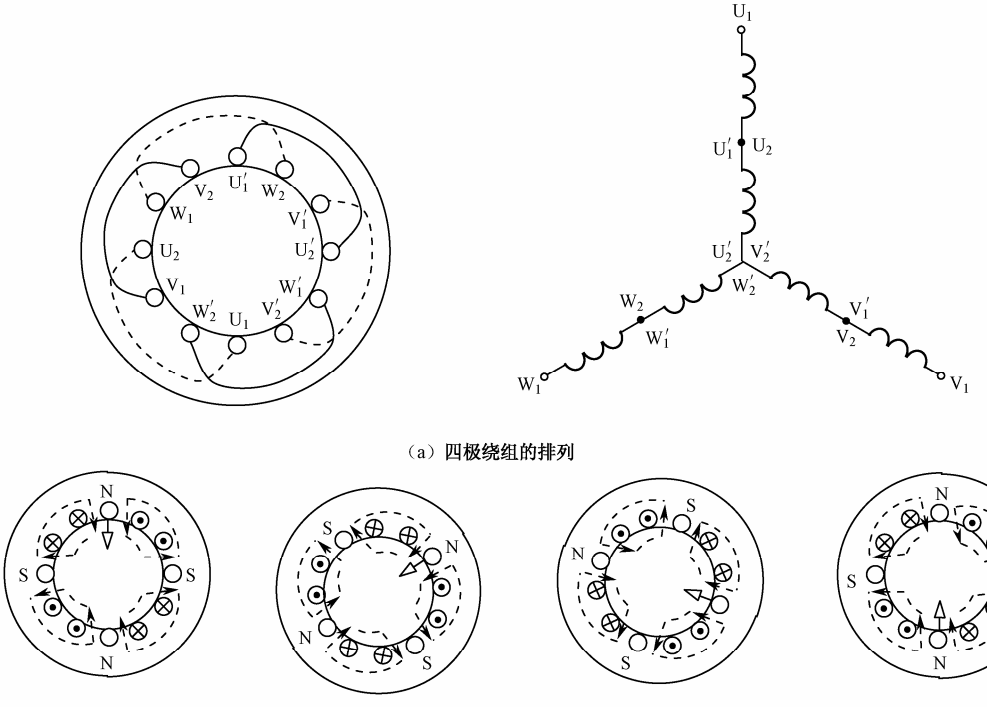
由此可见，三相绕组通入三相交流电流时，将产生旋转磁场。若满足两个对称（即绕组对称、电流对称），则此旋转磁场的大小便恒定不变（称为圆形旋转磁场），否则将产生椭圆形旋转磁场（磁场大小不恒定）。

由图 6-12 可看出，旋转磁场是沿顺时针方向旋转的，同 U→V→W 的顺序一致（这时 i_U 通入 U_1–U_2 线圈，i_V 通入 V_1–V_2 线圈，i_W 通入 W_1–W_2 线圈）。如果将定子绕组接到电源三根端线中的任意两根对调一下，例如将 V、W 两根对调，也就是说通入 V_1–V_2 线圈的电流是 i_W，而通入 W_1–W_2 线圈的电流是 i_V，则此时三个线圈中电流的相序是 U→W→V，因而旋转磁场的旋转方向就变为 U→W→V，即沿逆时针方向旋转，与未对调端线时的旋转方向相反。由此可知，旋转磁场的旋转方向总与定子绕组中三相电流的相序一致。所以，只要将三相电源线中的任意两相与绕组端的连接顺序对调，就可改变旋转磁场的旋转方向。

以上分析的是每相绕组只有一个线圈的情况，产生的旋转磁场具有一对磁极，它在空间每秒钟的转数与通入定子绕组的交流电的频率 f_1 在数值上相等，即每秒 f_1 转，因而每分钟的转数为 $60f_1$（r/min）。

（2）四极旋转磁场的产生

如果每相绕组由两个线圈组成，三相共有六个线圈，各绕组的位置互差 120°，并把两个互差 90° 的线圈串联起来作为一个相绕组，如图 6-13（a）所示。那么通入三相交流电时，便产生两对磁极（四极）的磁场，如图 6-13（b）所示。



（a）四极绕组的排列

（b）四极旋转磁场

图 6-13　四极绕组及其旋转磁场

在图 6-13（b）中绘出了 t=t_0、t_1、t_2、t_3 几个瞬间的各绕组的电流流向及合成磁场的方向。为了观察在交流电的一个周期内磁场旋转了多少度，可任意假定某一磁极，不难发现，在交

流电的一个周期内磁场仅旋转了半周，即其旋转速度比一对磁极时减慢了一半，即

$$n_1=\frac{60f_1}{2}\quad(\text{r/min})$$

如果线圈数目增为 9 个，即每相绕组有三个线圈，旋转磁场的磁极将增至为三对，则旋转速度应为 $\frac{60f_1}{3}$（r/min）。一般地，若旋转磁场的磁极对数为 p，则它的转速为：

$$n_1=\frac{60f_1}{p}\tag{6.1}$$

式中，n_1 为旋转磁场的转速，亦称为电动机的同步转速；f_1 为定子绕组电流的频率（国产的 f_1=50Hz）；p 是磁极对数。

2. 三相异步电动机的运转原理

三相异步电动机的工作原理，如图 6-14 所示。

电生磁：定子三相绕组 U、V、W，通入三相交流电产生旋转磁场，其转向为逆时针方向，转速为 $n_1=\frac{60f_1}{p}$。假定该瞬间定子旋转磁场的方向向下。

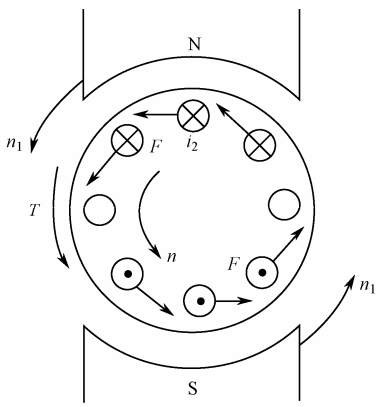


图 6-14　三相异步电动机运转原理图

（动）磁生电：定子旋转磁场旋转切割转子绕组，在转子绕组中产生感应电动势和感应电流 ，其方向由“右手螺旋定则”判断，如图 6-14 所示。这时转子绕组感应电流在定子旋转磁场的作用下产生电磁力，其方向由“左手定则”判断，如图 6-14 所示。该力对转轴形成转矩（称为电磁转矩），并可见，它的方向与定子旋转磁场（即电流相序）一致，于是，电动机在电磁转矩的驱动下，以 n 的速度顺着旋转磁场的方向旋转。

三相异步电动机的转速 n 恒小于定子旋转磁场的转速 n_1，只有这样，转子绕组与定子旋转磁场之间才有相对运动（转速差），转子绕组才能感应电动势和电流，从而产生电磁转矩。因而 $n<n_1$（有转速差）是异步电动机旋转的必要条件，异步的名称也由此而来。

三相异步电动机的转速差（n_1–n）与旋转磁场转速 n_1 的比率，称为转差率。用 s 表示为：

$$s=\frac{n_1-n}{n_1}\tag{6.2}$$

转差率是分析异步电动机运行的一个重要参数，它与负载情况有关。当转子尚未转动（如启动瞬间）时，n=0，s=1；当转子转速接近于同步转速（空载运行）时，$n\approx n_1$，$s\approx 0$。因此对异步电动机来说，s 在 0~1 范围内变化。异步电动机负载越大，转速越慢，转差率越大；负载越小，转速越快，转差率就越小。由上式推得：

$$n=(1-s)n_1=\frac{60f_1}{p}(1-s)\tag{6.3}$$

当电动机的转速等于额定转速，即 n_2=n_N 时，$s_N=\frac{n_1-n_N}{n_1}$。异步电动机带额定负载时，

s_N=0.02~0.07，可见异步电动机的转速很接近旋转磁场转速；空载时，s_0=0.05%~0.5%。

3. 三相异步电动机的铭牌和技术数据

铭牌的作用是向使用者简要说明这台设备的一些额定数据和使用方法，因此看懂铭牌，按照铭牌的规定去使用设备，是正确使用这台设备的先决条件。例如，一台三相异步电动机铭牌数据如表 6-1 所示。

表 6-1　三相异步电动机的铭牌

三 相 异 步 电 动 机		
型号 Y160M−6*	功率 7.5kW	频率 50Hz
电压 380V	电流 17A	接法△
转速 970r/min	绝缘等级　B	工作方式连续
年　月　日	编号	××电机厂

（1）型号

型号是为了便于各部门业务联系和简化技术文件对产品名称、规格、形式的叙述等而引用的一种代号，由汉语拼音字母、国际通用符号和阿拉伯数字三部分组成。如 Y160M−6*，其中，Y 为产品代号，三相异步电动机；160M−6 为规格代号：表明 160 代表中心高 160mm，M 代表中机座（短机座用 S 表示，长机座用 L 表示），6 代表 6 极；*表明本型号为中、小型三相异步电动机，对大型异步电动机的规格代号表示略有不同。

各类型电动机的主要产品代号意义摘录于表 6-2 中。

表 6-2　三相异步电动机产品代号

产 品 名 称	产 品 代 号	代号汉字意义
三相异步电动机	Y	异
绕线式三相异步电动机	YR	异绕
三相异步电动机（高启动转矩）	YQ	异启
多速三相异步电动机	YD	异多
防爆型三相异步电动机	YB	异爆

（2）额定功率 P_N：指电动机在额定状态下运行时，转子轴上输出的机械功率，单位为 kW。

（3）额定电压 U_N：指电动机在额定运行的情况下，三相定子绕组应接的线电压值，单位为 V。

（4）额定电流 I_N：指电动机在额定运行的情况下，三相定子绕组的线电流值，单位为 A。

三相异步电动机额定功率、电压、电流之间的关系为：

$$P_N=\sqrt{3}\,U_N I_N\cos\varphi_N\eta_N \tag{6.4}$$

（5）额定转速 n_N：指额定运行时电动机的转速，单位为 r/min。

（6）额定频率 f_N：我国电网频率为 50Hz，故国内异步电动机频率均为 50Hz。

（7）接法：电动机定子三相绕组有 Y 形连接和△形连接两种，前已叙述。

（8）温升及绝缘等级：温升是指电机运行时绕组温度允许高出周围环境温度的数值。但允许高出数值的多少由该电动机绕组所用绝缘材料的耐热程度决定，绝缘材料的耐热程度称

为绝缘等级，不同绝缘材料，其最高允许温升是不同的。按耐热程度不同，将电动机的绝缘等级分为 A、E、B、F、H、C 等几个等级，它们允许的最高温度如表 6-3 所示，其中最高允许温升是按环境温度 40° C 计算出来的。

表 6-3　绝缘材料温升限值

绝缘等级	A	E	B	F	H	C
最高允许温度/° C	105	120	130	155	180	＞180

（9）工作方式：为了适应不同负载需要，按负载持续时间的不同，国家标准把电动机分成了三种工作方式：连续工作制、短时工作制和断续周期工作制。

除上述铭牌数据外，还可由产品目录或电工手册中查得其他一些技术数据。

6.1.3　三相异步电动机的电磁转矩和机械特性

1. 三相异步电动机的电磁转矩

由三相异步电动机的工作原理可知，异步电动机的电磁转矩是由与转子电动势同相的转子电流（即转子电流的有功分量）和定子旋转磁场相互作用产生的，可见电磁转矩与转子电流有功分量（I_{2a}）及定子旋转磁场的每极磁通（Φ）成正比，即

$$T=c_T \Phi I_2 \cos\varphi_2 \tag{6.5}$$

式中，c_T 为计算转矩的结构常数，$\cos\varphi_2$ 为转子回路的功率因数。

需要说明的是，当磁通一定时，电磁转矩与转子电流有功分量 I_{2a} 成正比，而并非与转子电流 I_2 成正比。当转子电流大，若大的是转子电流无功分量，则此时的电磁转矩就不大，以上为启动瞬间情况。

经推导还可以求出电磁转矩与电动机参数之间的关系为：

$$T = c'_T U_1^2 \frac{sR_2}{R_2^2 + (sX_{20})^2} \tag{6.6}$$

式中，c'_T 为电动机的结构常数，R_2 为转子绕组电阻，X_{20} 为转子不转时转子绕组的漏感抗。

由式（6.6）可知，$T \propto U_1^2$。可见电磁转矩对电源电压特别敏感，当电源电压波动时，电磁转矩按 U_1^2 关系发生变化。

2. 三相异步电动机的转矩特性

由式（6.6）可知，当 U_1、R_2、X_{20} 为定值时，$T=f(s)$ 之间的关系称为电动机的转矩特性，如图 6-15 所示。当电动机空载时，$n \approx n_1$，$s \approx 0$，故 $T=0$；当 s 尚小时（sX_{20}）^{2} 很小，可略去不计，此时 $T \propto s$，故当 s 增大，T 也随之增大；当 s 大到一定值后，$(sX_{20})^2 >> R_2$，R_2 可略去不计，此时 $T \propto \frac{1}{s}$，故 T 随 s 增大反而下降，T-s 曲线上升至下降的过程中，必出现一个最大值，此即为最大转矩 T_{max}。

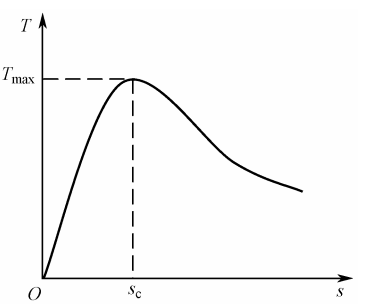


图 6-15　三相异步电动机的 T—s 曲线

3. 三相异步电动机的机械特性

由 $n=(1-s)n_1$ 关系式，可将 T-s 关系改为 $n=f(T)$ 关系，此即为异步电动机的机械特性，如图 6-16 所示。因 n 与 T 均属机械量，故称此特性为机械特性，它直接反映了当电动机转矩变化时转速的情况。

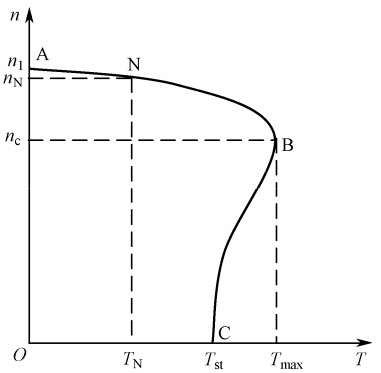


图 6-16　三相异步电动机的机械特性

从理论上说，异步电动机的转差率 s 在 0~1 范围内，即转速 n 在 n_1~0 范围内，但实际上并非在此范围内电动机均能稳定运行。经分析可知，在机械特性曲线的 AB 段（见图 6-16），即 $n_1>n>n_c$（n_c 为最大转矩所对应的转速）区段，当作用在电动机轴上的负载转矩发生变化时，电动机能适应负载的变化而自动调节达到稳定运行，故为稳定区。该区域的曲线较为平坦，当负载到满载，其转速 n 变化（下降）很少，故具有较硬的机械特性，这种特性很适用于金属切削机床等工作机械。

机械特性曲线的 BC 段，即 $n_c>n>0$ 区段为不稳定区，电动机工作在该区段，其电磁转矩不能自动适应负载转矩的变化。

为了正确使用异步电动机，除需注意机械特性曲线上的两个区域外，还要关注三个特征转矩。

（1）额定转矩 T_N

它是电动机额定运行时产生的电磁转矩，可由铭牌上的 P_N 和 n_N 求得：

$$T_N = 9550\frac{P_N}{n_N} \tag{6.7}$$

式中，T_N 的单位为 N·m，P_N 的单位为 kW，n_N 的单位为 r/min。

由式（6.7）可知，当输出功率 P_N 一定时，额定转矩与转速成反比，也近似与磁极对数成正比（因为 $n\approx n_1=\frac{60f_1}{p}$，故频率一定时，转速近似与磁极对数成反比）。可见，相同功率的异步电动机，磁极对数越多或转速越低，其额定转矩越大。

图 6-16 所示的 $n=f(T)$ 曲线中的 N 点是额定转矩 T_N 和额定转速 n_N 所对应的点，称为额定工作点。异步电动机若运行于此点附近，其效率及功率因数均较高。

（2）最大转矩 T_{max}

由图 6-15 所示的转矩特性曲线可知，电动机有一个最大转矩 T_{max}，令 $\frac{dT}{ds}=0$，则可求得产生最大转矩的临界转差率 s_c 为：

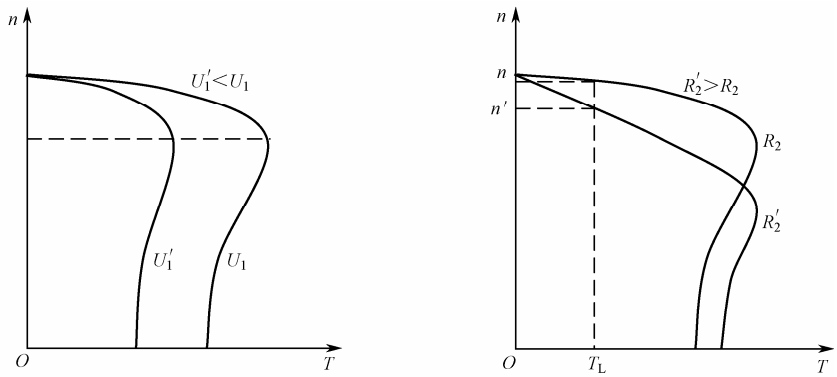
$$s_c = \frac{R_2}{X_{20}} \tag{6.8}$$

代入式（6.6）得：

$$T_{max} = c'_T\frac{U_1^2}{2X_{20}} \tag{6.9}$$

由式（6.8）和式（6.9）可知：$s_c \propto R_2$，而与 U_1 无关；$T_{max}\propto U_1^2$，而与 R_2 无关。由此可

以得到改变电源电压 U_1 和转子电路电阻 R_2 的机械特性，如图 6-17 所示。



（a）改变电压的机械特性　　（b）改变转子电路电阻的机械特性

图 6-17　对应于不同 U_1 和 R_2 的机械特性曲线

当电动机负载转矩大于最大转矩，即 $T_L > T_{max}$ 时，电动机就要停转，此时电动机电流即刻能升至（5~7）I_N，致使绕组过热而烧毁。

最大转矩对电动机的稳定运行有重要意义。当电动机负载突然增加，短时过载，接近于最大转矩时，电动机仍能稳定运行，由于时间短，也不至于过热。为了保证电动机稳定运行，不因短时过载而停转，要求电动机有一定的过载能力。把最大转矩与额定转矩之比称为过载能力，也称为最大转矩倍数，用λ_m表示为：

$$\lambda_m = \frac{T_{max}}{T_N} \tag{6.10}$$

一般三相异步电动机的λ_m在 1.8~ 2.2 范围内。

（3）启动转矩 T_{st}

电动机刚启动瞬间，即 n=0，s=1 时的转矩叫启动转矩。将 s=1 代入式（6.6），得：

$$T_{st} = c_T' U_1^2 \frac{R_2}{R_2^2 + X_{20}^2} \tag{6.11}$$

只有当启动转矩大于负载转矩时，电动机才能启动。启动转矩越大，启动就越迅速，由此引出电动机的另一个重性能指标——启动能力 K_{st}，用下式表示为：

$$K_{st} = \frac{T_{st}}{T_N} \tag{6.12}$$

K_{st} 反映了电动机启动负载的能力。一般三相异步电动机的 K_{st}=1.0~ 2.2。



应用举例 —— 练一练

例 6.1　一台额定转速 n_N=1450r/min 的三相异步电动机，试求它额定负载运行时的转差率 s_N。

解　$n_N \approx n_1 = \dfrac{60 f_1}{p}$

$$p \approx \frac{60 f_1}{n_N} = \frac{60 \times 50}{1450} = 2.07$$

取 p=2，则

$$n_1=\frac{60f_1}{p}=\frac{60\times 50}{2}=1500\ (\text{r/min})$$

$$s_N=\frac{n_1-n_N}{n_1}=\frac{1500-1450}{1500}=0.033$$

例 6.2 已知某三相异步电动机额定功率 P_N=4kW，额定转速 n_N=1440r/min，过载能力为 2.2，启动能力为 1.8。试求额定转矩 T_N、启动转矩 T_{st}、最大转矩 T_{max}。

解 额定转矩为：$T_N=9550\dfrac{P_N}{n_N}=9550\times\dfrac{4}{1440}$=26.5 (N・m)

启动转矩为：T_{st}=1.8T_N=1.8×26.5=47.7 (N・m)

最大转矩为：T_{max}=2.2T_N=2.2×26.5=58.3 (N・m)



实践操作 —— 做一做

（1）观察给定的三相异步电动机的结构，抄录电动机的铭牌数据，将有关数据填入表 6-4 中。用手拨动电动机的转子，观察其转动情况是否良好。

表 6-4 三相异步电动机的铭牌数据

型　号		功　率		频　率	
电　压		电　流		接　法	
转　速		绝缘等级		工作方式	

（2）按图 6-18 所示电路接线。测量电源电压，根据电源电压和电动机的铭牌数据确定电动机绕组应采用的连接形式。选择合适的电压表和电流表的量程，将电动机外壳接地。

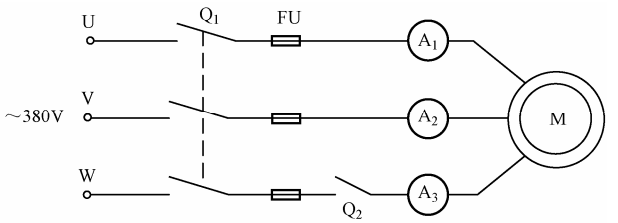


图 6-18 三相异步电动机的实验电路图

合上电源开关 Q_1，观察三相异步电动机直接启动时的启动电流，将数据记入表 6-5 中，记住这时电动机的转动方向，并以这个转动方向为正转方向。待电动机转速稳定后，测量电动机空载运行时的转速和线电流 I_U、I_V、I_W，记入表 6-5 中。

表 6-5 三相异步电动机的启动和空载运行的测试数据

电源线电压(V)	电动机转向	启动电流(A)	空载转速（r/min）	空载电流（A）			$s_0=\dfrac{n_1-n_0}{n_1}$	$\dfrac{\text{空载电流}}{\text{额定电流}}$
				I_U	I_V	I_W		
380	正转							
380	反转							

断掉电源开关 Q_1，将电动机三根电源线中的任意两根对调，然后合上电源开关 Q_1，再测启动电流和空载电流、空载转速。观察电动机的转向对上面各量有无影响。

仍断开开关 Q_2，以便观察电动机单相启动情况。具体做法是：先用手朝任一方向拨动电动机转轴，然后松手，在电动机尚未停转时接通电源，观察电动机的启动情况和转动方向。



问题研讨 —— 想一想

（1）试比较三相异步电动机与变压器的主要异同点。

（2）有的三相异步电动机有 380/220V 两种额定电压，定子绕组可以接成星形或者三角形，试问何时采用星形接法？何时采用三角形接法？

（3）在工厂里检修异步电动机时，常发现烧毁的仅是三相绕组中的某一相或某二相绕组，你能说明这是由于哪些原因造成的吗？可采用什么措施防止此类事故的发生？

（4）在实验中，是否发现实验用的小型电动机的空载电流与额定电流的比值很大（大容量电动机的这一比值小些），即电动机的空载电流较接近满载时的电流，这是什么原因？这时电动机功率因数的大小如何？为什么从节约用电的要求来说，不宜用大容量电动机来拖动小功率负载？

任务 6.2　三相异步电动机的使用与测试



任务描述

生产机械的工作过程中运动的变化离不开对电动机的控制。电动机的工作过程分为三个阶段：启动、运行和停止。启动阶段要求有全压启动和降压启动控制，运行阶段要求有正、反转和调速控制，停止阶段要求有自然停止和制动控制。本任务学习三相异步电动机的启动、调速、反转与制动等方法。



任务目标

掌握三相异步电动机的启动方法、调速方法、反转方法及制动方法。



任务实施



知识链接 —— 学一学

6.2.1　三相异步电动机的启动与反转

电动机接上电源，转速由零开始运转，直至稳定运转状态的过程称为启动。对电动机启

动要求是：电流小，转矩大，时间短。

当异步电动机刚接上电源，转子尚未旋转瞬间（n=0），定子旋转磁场对静止转子的相对速度最大，于是转子绕组的感应电动势和电流也最大，则定子的感应电流也最大，它往往可达 5~7 倍的额定电流。理论分析指出，启动瞬间转子电流虽大，但转子的功率因数 $\cos\varphi_2$ 很低，故此时转子电流的有功分量却不大（而无功分量大），因此启动转矩不大，它只有额定转矩的 1.0~2.2 倍，所以鼠笼式异步电动机的启动性能较差。

1. 鼠笼式异步电动机的启动

鼠笼式异步电动机的启动方法有直接启动（全压启动）和降压启动。

（1）直接启动

把电动机三相定子绕组直接加上额定电压的启动叫直接启动，如图 6-19 所示。此方法启动最简单，投资少，启动时间短，启动可靠，但启动电流大。是否可采用直接启动，就取决于电动机的容量及启动频繁的程度。

直接启动一般只用于小容量的电动机（如 7.5kW 以下电动机），对较大容量的电动机，电源容量又较大，若电动机启动电流倍数 K_I、容量和电网容量满足以下经验公式：

$$K_I=\frac{I_{st}}{I_N}\leqslant\frac{1}{4}\left[3+\frac{\text{电源容量(kV}\cdot\text{A)}}{\text{启动电动机的容量(kW)}}\right] \tag{6.13}$$

则电动机可采用直接启动方法，否则应采用降压启动。

（2）降压启动

降压启动的主要目的是为了限制启动电流，但问题是在限制启动电流的同时启动转矩也受到限制，因此它只适用于在轻载或空载情况下启动。最常用的降压启动方法有 Y-△换接降压启动和自耦变压器启动。

①Y-△换接降压启动。Y-△换接降压启动只适用于定子绕组的△形连接，且每相绕组都有两个引出端子的三相笼式异步电动机，其原理接线图如图 6-20 所示。

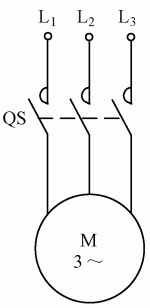


图 6-19　直接启动线路

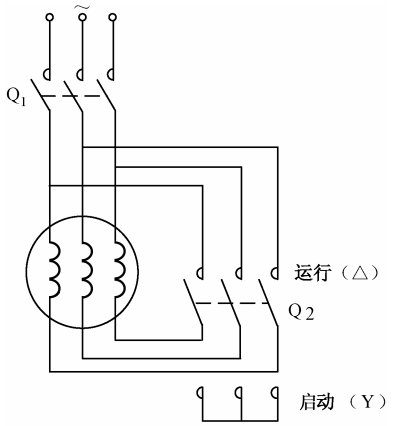


图 6-20　Y—△换接降压启动接线图

启动前先将 Q_2 合向“启动”位置，定子绕组接成 Y 形连接，然后合上电源开关 Q_1 进行启动，此时定子每相绕组所加电压为额定电压的 $1/\sqrt{3}$，从而实现了降压启动。待转速上升至

一定值后，迅速将 Q_2 扳至“运行”位置，恢复定子绕组为△形连接，使电动机每相绕组在全压下运行。

由三相交流电路知识可推得：Y 形连接启动时电流为△形连接直接启动时电流的$\frac{1}{3}$，其启动转矩也为△形连接直接启动时转矩的$\frac{1}{3}$，即

$$\begin{cases} I_{\mathrm{stY}} = \dfrac{1}{3} I_{\mathrm{st}\Delta} \\ T_{\mathrm{stY}} = \dfrac{1}{3} T_{\mathrm{st}\Delta} \end{cases} \tag{6.14}$$

Y-△换接降压启动设备简单，成本低，操作方便，动作可靠，使用寿命长。目前，4~100kW 异步电动机均设计成 380V 的△形连接，此启动方法得到了广泛应用。

② 自耦变压器降压启动。对容量较大或正常运行时，接成 Y 形连接的鼠笼式三相异步电动机常采用自耦变压器降压启动，其原理接线图如图 6-21 所示。

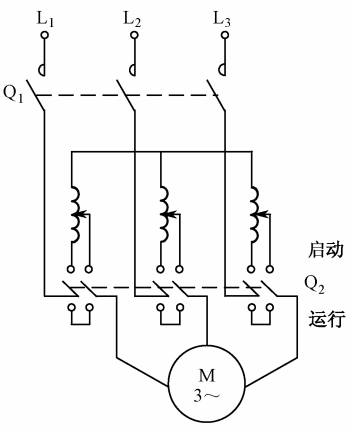


图 6-21　自耦变压器降压启动

启动前先将 Q_2 合向“启动”位置，然后合上电源开关 Q_1，这时自耦变压器的一次绕组加全电压，抽头的二次绕组电压加在电动机定子绕组上，电动机便在低电压下启动。待转速上升至一定值，迅速将 Q_2 切换到“运行”位置，切除自耦变压器，电动机就在全电压下运行。

用这种方法启动，电网供给的启动电流是直接启动时电流的$\frac{1}{k^2}$（k 为自耦变压器的变比），启动转矩也为直接启动时转矩的$\frac{1}{k^2}$，即

$$\begin{cases} I'_{\mathrm{st}} = \dfrac{1}{k^2} I_{\mathrm{st}} \\ T'_{\mathrm{st}} = \dfrac{1}{k^2} T_{\mathrm{st}} \end{cases} \tag{6.15}$$

自耦变压器设有三个抽头，可得到三种不同的电压，以便根据启动转矩的要求而灵活选用。

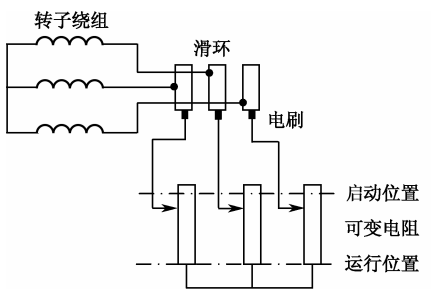


图 6-22　绕线式转子与启动变阻器的连接

2. 绕线式三相异步电动机的启动

绕线式三相异步电动机的启动，只要在转子回路串入适当的电阻，如图 6-22 所示，就既可限制启动电流，又可增大启动转矩，克服了鼠笼式异步电动机启动电流大、启动转矩小的缺点。绕线式异步电动机在启动过程中，需逐级将启动电阻切除。

普通鼠笼式异步电动机启动转矩较小，若满足不了要求，可选用具有较大启动转矩的双笼式或深槽式

异步电动机。而绕线式异步电动机的启动转矩更大，它适用于要求启动转矩较大的生产机械，如卷扬机、起重机等。



应用举例 —— 练一练

例 6.3 已知一台三相鼠笼式异步电动机，P_N=75kW，△形连接运行，U_N=380V，I_N=126A，n_N=1480r/min，I_{st}/I_N=5，T_{st}/T_N=1.9，负载转矩 T_L=100N·m，现要求电动机启动时 $T_{st}\geqslant 1.1\ T_L$，$I_{st}<240$A。问：（1）电动机能否直接启动？（2）电动机能否采用 Y-△换接降压启动？（3）若采用 3 个抽头的自耦变压器降压启动，则应选用 50%，60%，80%中的哪个抽头？

解 （1）一般来说，7.5kW 以上的电动机不能采用直接启动法，但可以进行如下计算：

电动机的额定转矩为：$T_N=9550\dfrac{P_N}{n_N}=9550\times\dfrac{75}{1480}=483.95\ (\text{N•m})$

直接启动时的启动转矩为：$T_{st}=1.9\times T_N=1.9\times 483.95=919.5\,(\text{N•m})$

则

$$T_{st}>1.1T_L=1.1\times 100=110\,(\text{N•m})$$

直接启动电流为：$I_{st}=5I_N=5\times 126=630(\text{A})$

直接启动电流远大于本题要求的 240A。因此，本题的启动转矩虽然满足要求，但启动电流却大于供电系统要求的最大电流，所以不能采用直接启动。

（2）若采用 Y-△换接降压启动时：

启动转矩为：$T_{stY}=\dfrac{1}{3}T_{st}=\dfrac{1}{3}\times 919.5=306.5\ \text{N•m}>1.1T_L=110\,(\text{N•m})$

启动电流为：$I_{stY}=\dfrac{1}{3}I_{st}=\dfrac{1}{3}\times 630=210<240(\text{A})$

启动转矩和启动电流都满足要求，故可以采用 Y-△换接降压启动。

（3）若采用自耦变压器降压启动方式时：

在 50%抽头时启动转矩和启动电流分别为：

$$T_{st1}=\frac{1}{k^2}T_{st}=0.5^2\times 919.5=229.88\ (\text{N•m})$$

$$I_{st1}=\frac{1}{k^2}I_{st}=0.5^2\times 630=157.5\ (\text{A})$$

在 60%抽头时启动转矩和启动电流分别为：

$$T_{st2}=0.6^2T_{st}=0.6^2\times 919.5=331.02\ (\text{N•m})$$

$$I_{st2}=0.6^2I_{st}=0.6^2\times 630=226.8\ (\text{A})$$

在 80%抽头时启动转矩和启动电流分别为：

$$T_{st3}=0.8^2T_{st}=0.8^2\times 919.5=588.48\ (\text{N•m})$$

$$I_{st3}=0.8^2I_{st}=0.8^2\times 630=403.2\ (\text{A})$$

从以上计算结果可以看出，80%抽头的启动电流大于启动要求，60%抽头的启动电流较大，故选用 50%的抽头较为合适。

3　三相异步电动机的反转

由上述知识知道，只要把从电源接到定子的三根端线，任意对调两根，磁场的旋转方向就会改变，电动机的旋转方向就随之改变。

改变电动机的旋转方向，一般应在停车之后换接。如果电动机正在高速旋转时突然将电源反接，不但冲击强烈，而且电流较大，如无防范措施，很容易发生事故。

6.2.2　三相异步电动机的调速

为了提高生产效率或满足生产工艺的要求，许多生产机械在工作过程中都需要调速。由 $n=(1-s)n_1=\dfrac{60f_1}{p}(1-s)$，可知，三相异步电动机的调速方法有：变极（$p$）调速、变频（$f_1$）调速和变转差率（$s$）调速。

1. 变极调速

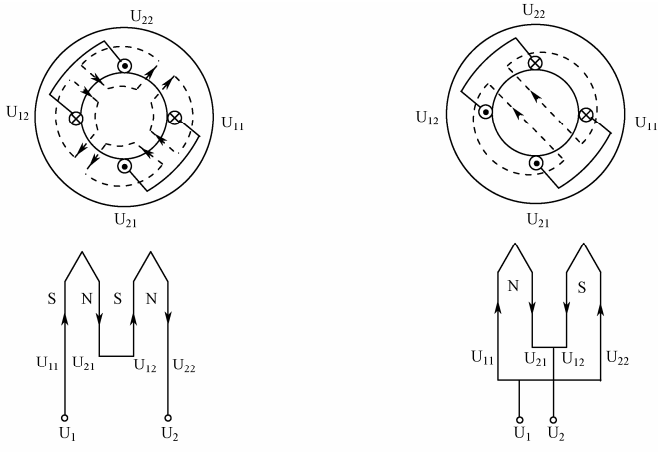
由上式知，当电源频率 f_1 一定时，转速 n 近似与磁极对数成反比，磁极对数增加一倍，转速近似地减小一半。可见改变磁极对数就可调节电动机转速。

由上式还可知，变极实质上是改变定子旋转磁场的同步转速，同步转速是有级的，故变极调速也是有级的（即不能平滑调速）。

定子绕组的变极是通过改变定子绕组线圈端部的连接方式来实现的，它只适用于鼠笼式异步电动机，因为鼠笼式转子的极对数能自动地保持与定子极对数相等。

所谓改变定子绕组线圈端部的连接方式，实质就是把每相绕组中的半相绕组改变电流方向（半相绕组反接）来实现变极的，如图 6-23 所示。把 U 相绕组分成两半：线圈 U_{11}、U_{21} 和 U_{12}、U_{22}，图 6-23（a）所示为两线圈串联，得 p=2；图 6-23（b）所示是两线圈并联，得 p=1。

应当注意：在变极调速的同时必须改变电源的相序，否则电动机就反转。



（a）两线圈串联　　（b）两线圈并联

图 6-23　改变极对数的方法

2. 变频调速

变压调速时，由于频率 f_1 能连续调节，故可获得较大范围的平滑调速，它属无级调速，其调速性能好，但它需要有一套专用的变频设备。随着晶闸管元件及变流技术的发展，交流变频变压调速已是 20 世纪 80 年代迅速发展起来的一种专门电力传动调速技术，是一种很有发展前途的三相异步电动机的调速装置。

3. 变转差率调速

在绕线式异步电动机转子回路里串可调电阻，在恒转矩负载下，转子回路电阻增大，其转速 n 下降。这种调速方法的优点是有一定的调速范围，设备简单，但能耗较大，效率较低，广泛用于起重设备。

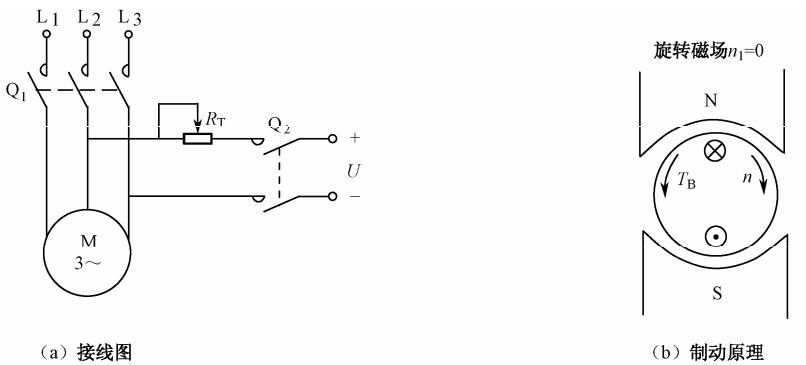
除此之外，利用电磁滑差离合器来实现无级调速的一种新型交流调速电动机——电磁调速三相异步电动机现已较多应用。

6.2.3 三相异步电动机的制动

许多生产机械工作时，为提高生产力和安全起见，往往需要快速停转或由高速运行迅速转为低速运行，这就需要对电动机进行制动。所谓制动，就是要使电动机产生一个与旋转方向相反的电磁转矩（即制动转矩），可见电动机制动状态的特点是电磁转矩方向与转动方向相反。三相异步电动机常用的制动方法有能耗制动、反接制动和回馈制动。

1. 能耗制动

三相异步电动机能耗制动接线如图 6-24（a）所示。制动方法是在切断电源开关 Q_1 的同时闭合开关 Q_2，在定子两相绕组间通入直流电流，于是定子绕组产生一个恒定磁场，转子因惯性而旋转切割该恒定磁场，在转子绕组产生感应电动势和电流。由图 6-24（b）可判得，转子的载流导体与恒定磁场相互作用产生电磁转矩，其方向与转子转向相反，起制动作用，因此转速迅速下降，当转速下降至零时，转子感应电动势和电流也降为零，制动过程结束。制动期间，运转部分所储存的动能转变为电能消耗在转子回路的电阻上，故称为能耗制动。



（a）接线图　　（b）制动原理

图 6-24　三相异步电动机的能耗制动

对鼠笼式异步电动机，可调节直流电流的大小来控制制动转矩的大小；对绕线式异步电动机，还可采用转子串电阻的方法来增大初始制动转矩。

能耗制动能量消耗小，制动平稳，广泛应用于要求平稳准确停车的场合，也可用于起重机一类机械上，用来限制重物的下降速度，使重物匀速下降。

2. 反接制动

异步电动机反接制动接线如图 6-25（a）所示。制动时将电源开关 Q 由“运转”位置切换到“制动”位置，把它的任意两相电源接线对调。由于电压相序相反，所以定子旋转磁场方向也相反，而转子由于惯性仍继续按原方向旋转，这时转矩方向与电动机的旋转方向相反，如图 6-25（b）所示，成为制动转矩。

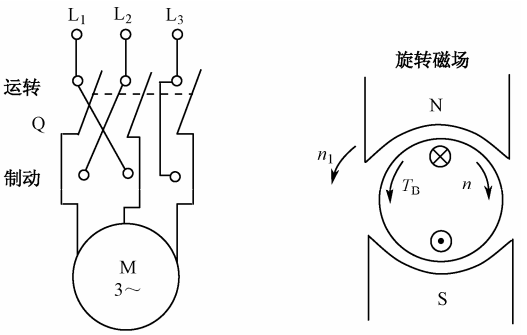


图 6-25　三相异步电动机的反接制动

若制动的目的仅为停车，则在转速接近于零时，可利用某种控制电器将电源自动切断，否则电机将会反转。

反接制动时，由于转子的转速相对于反转旋转磁场的转速较大（$n+n_1$），因此电流较大。为了限制启动电流，较大容量的电动机通常在定子电路（鼠笼式）或转子电路（绕线式）串接限流电阻。这种方法制动比较简单，制动效果好，在某些中型机床主轴的制动中常采用，但能耗较大。

3. 回馈制动

回馈制动发生在电动机转速 n 大于定子旋转磁场转速 n_1 的时候，如当起重机下放重物时，重物拖动转子，使转速 $n>n_1$，这时转子绕组切割定子旋转磁场方向与原电动状态相反，则转子绕组感应电动势和电流方向也随之相反，电磁转矩方向也反了，即由转向同向变为反向，成为制动转矩，如图 6-26 所示，使重物受到制动而均匀下降。实际上这台电动机已转入发电机运行状态，它将重物的势能转变为电能而回馈到电网，故称为回馈制动。

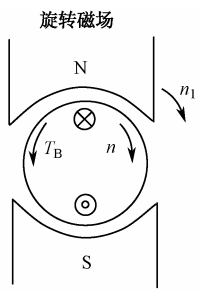


图 6-26　三相异步电动机的回馈制动



实践操作 —— 做一做

（1）三相异步电动机的启动实验

三相异步电动机星形—三角形降压启动，按图 6-27 连接线路。线接好后把调压器退到零位。三刀双掷开关合向右边（Y 接法）。合上电源开关，逐渐调节调压器使升压至电动机额定电压 220 伏，打开电源开关，待电动机停转。合上电源开关，观察启动瞬间电流，然后把 QS 合向左边，使电动机（Δ形接法）正常运行，整个启动过程结束。观察启动瞬间电流表的显示值以与其他启动方法定性比较。

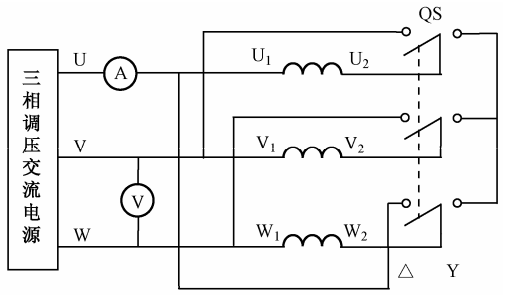


图 6-27　三相异步电动机星形—三角形降压启动接线图

（2）三相异步电动机的反转实验

换接三相电源两根线，观察三相异步电动机的旋转方向。

（3）三相异步电动机的调速实验

三相鼠笼式异步电动机变极调速，按图 6-28 所示连接线路。

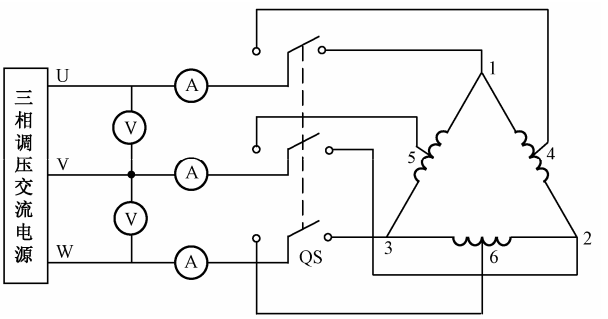


图 6-28　双速异步电动机（2/4 极）

把开关 QS 合向右边，使电动机为Δ接法（四极电动机）。接通交流电源（合上控制屏启动按钮），调节调压器，使输出电压为电动机额定电压 220 伏，并保持恒定，读出各相电流、电压及转速。

把 QS 合向左边（YY 接法），并把右边三端点用导线短接。电动机空载启动，保持输入电压为额定电压，读出各相电流、电压及转速，将数据记录于表 6-6 中。

表 6-6　三相绕线式异步电动机转子串调速电阻调速数据表

	电流/A			电压/V		n（r/min）
	I_U	I_V	I_W	U_{UV}	U_{VW}	
四极						
二极						

（4）三相异步电动机的制动实验

自拟三相异步电动机的反接制动实验线路图，并进行制动实验。



问题研讨 —— 想一想

（1）三相异步电动机的启动方法较多，应根据什么来选择合适的启动方法？

（2）试推导三相异步电动机 Y-△换接降压启动时启动电流、启动转矩与直接启动时的关系。

（3）线绕式异步电动机转子电路串启动电阻时，为什么能使启动电流减小，而启动转矩增大？

（4）生产设备在运行中哪些操作会涉及到制动问题？

（5）查资料，讨论并总结三相异步电动机的启动、制动等运行状态的特点。

任务 6.3　三相异步电动机基本控制线路的分析与装配



任务描述

生产机械的运动部件大多数是由电动机来拖动的，要使生产机械的各部件按设定的顺序进行运动，保证生产过程和加工工艺合乎预定要求，就必须对电动机进行自动控制，即控制电动机的启动、停止、正反转、调速和制动等。目前常见的一种控制方式，就是由继电器、接触器、按钮等低压电器构成的继电器—接触器控制系统。本任务首先熟悉常用低压电器的结构、动作过程、用途，然后对三相异步电动机的直接启动控制、正反转控制、Y-△换接降压启动等控制线路进行分析与装配。



任务目标

熟悉常用低压电器的基本结构、动作原理和用途。掌握常用低压电器的符号。能正确地绘制、分析、装配和调试三相异步电动机的直接启动控制、正反转控制、Y-△换接降压启动控制线路。



6.3.1 常用低压电器的认识

低压电器通常是指工作在交流电压 1200V、直流电压 1500V 以下电路中，起控制、调节、转换和保护作用的电气设备。它是构成电气控制线路的基本元件。低压电器的分类如下：

（1）按用途或所控制的对象分类

低压配电电器：主要用于配电电路，对电路及设备进行保护以及通断、转换电源或负载的电器，如刀开关、转换开关、熔断器和断路器。

低压控制电器：主要用于控制电气设备，使其达到预期要求的工作状态的电器，如接触器、控制继电器、主令控制器。

（2）按动作方式分类

自动切换电器：依靠电器本身参数变化和外来信号（如电、磁、光、热等）而自动完成接通或分断的电器，如接触器、继电器和电磁铁。

非自动切换电器：依靠人力直接操作的电器，如按钮、负荷开关等。

（3）按低压电器的执行机构分类

有触点电器：这类电器具有机械可分动的触点系统，利用动、静触点的接触和分离来实现电路的通断。

无触点电器：这类电器没有可分动的机械触点，主要利用功率晶体管的开关效应，即导通或截止来控制电路的阻抗，以实现电路的通断与保护。

1. 开启式负荷开关

开启式负荷开关是一种手动电器，其主要部件是刀片（动触点）和刀座（静触点）。按刀片数量不同，开启式负荷开关可分为单刀、双刀和三刀三种。图 6-29 为胶木盖瓷座三刀开启式负荷开关的结构和符号。

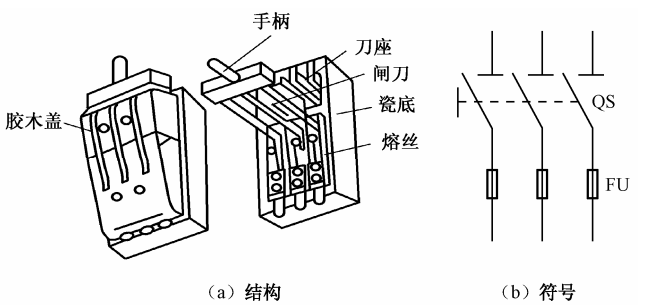


图 6-29　开启式负荷开关

开启式负荷开关主要作为电源的隔离开关，也就是说，在不带负载（用电设备无电流通过）的情况下切断和接通电源，以便对作为负载的设备进行维修、更换熔丝或对长期不工作

的设备切断电源。这种场合下使用时，开启式负荷开关的额定电流只需等于或略大于负载的额定电流。

开启式负荷开关也可以在手动控制电路中作为电源开关使用，直接用它来控制电动机启、停操作，但电动机的容量不能过大，一般限定在小于 7.5kW 以下。作为电源开关的闸刀其额定电流应大于电动机额定电流的 3 倍。

2. 封闭式负荷开关

封闭式负荷开关与开启式负荷开关的不同之处是将熔断器和刀座等安装在薄钢板制成的防护外壳内。在铁壳内部有速断弹簧，用以加快刀片与刀座分断速度，减少电弧。封闭式负荷开关的外形如图 6-30 所示。

在封闭式负荷开关的外壳上，还设有机械联锁装置，使壳盖打开时开关不能闭合，开关断开时壳盖才能打开，从而保证了操作安全。封闭式负荷开关一般用在电力排灌、电热器等设备中，用于不频繁接通和分断电路。

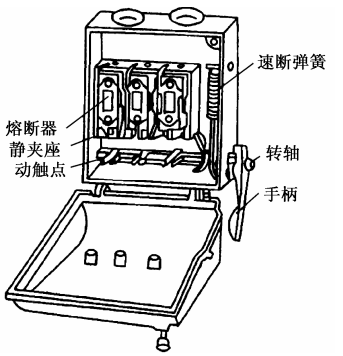


图 6-30　封闭式负荷开关

3. 按钮

按钮是一种简单的手动电器。按钮的结构主要由桥式双断点的动触点和静触点及按钮帽和复位弹簧组成。按钮的外形、结构及符号如图 6-31 所示。

当用手按下按钮帽时，动触点向下移动，上面的动断（常闭）触点先断开，下面的动合（常开）触点后闭后。当松开按钮帽时，在复位弹簧的作用下，动触点自动复位，使得动合触点先断开，动断触点后闭合。这种在一个按钮内分别安装有动断和动合触点的按钮称为复合按钮。

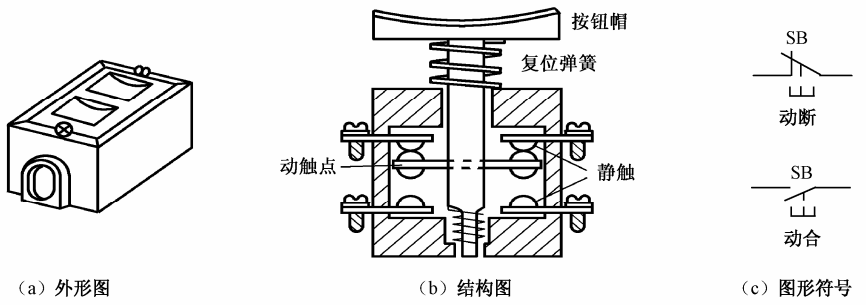


图 6-31　按钮开关

4. 熔断器

熔断器是一种保护电器，主要应用于短路保护。熔断器主要由熔体和外壳组成。由于熔断器串联在被保护的电路中，所以当过大的短路电流流过易熔合金制成的熔体（熔丝或熔片）时，熔体因过热而迅速熔断，从而达到保护电路及电气设备的目的。根据外壳的不同，有多种形式的熔断器可供选用。几种常见的熔断器的外形及符号如图 6-32 所示。

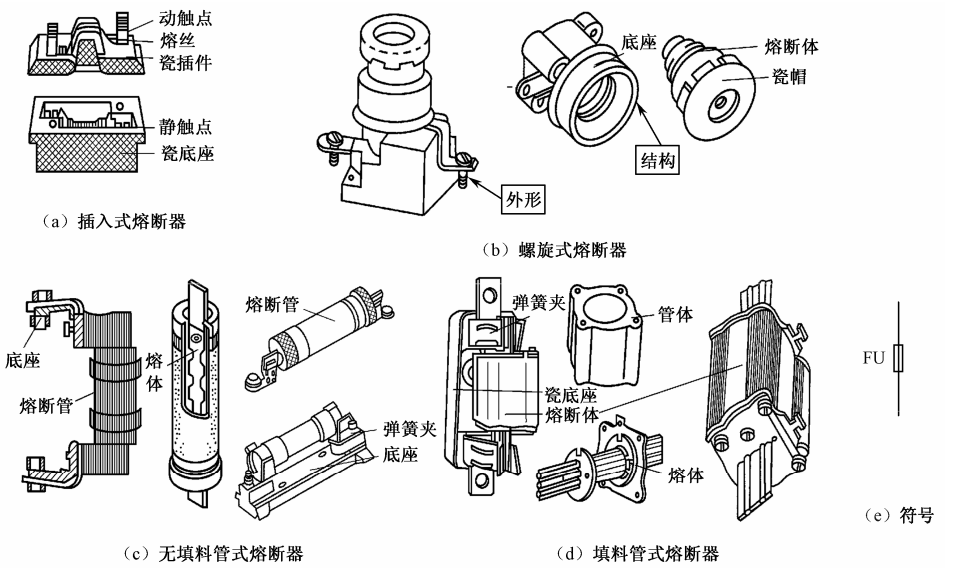


图 6-32　熔断器

由于熔体熔断所需要的时间与通过熔体电流的大小有关，为了达到既能有效实现短路保护，又能维持设备正常工作的目的，一般情况下，要求通过熔体的电流等于或小于额定电流的 1.25 倍时，熔体可以长期不熔断；超过其额定电流的倍数越大，熔体熔断时间越短。

5. 交流接触器

交流接触器是一种自动控制电器。它由电磁铁和触点组等主要部件组成。交流接触器的结构、原理及符号如图 6-33 所示。电磁铁的铁芯分为动、静铁芯，一般静铁芯是固定不动的，动铁芯在接触器线圈通电时，在电磁吸力作用下向静铁芯移动；线圈断电时，在复位弹簧作用下恢复到原来位置。接触器触点组的动触点与铁芯直接相连，当动铁芯移动时，拖动动触点相应移动。在交流接触器中有动合与动断触点各两对，辅助触点接触面积较小，不带有灭弧装置，所以允许通过的电流也就较小。

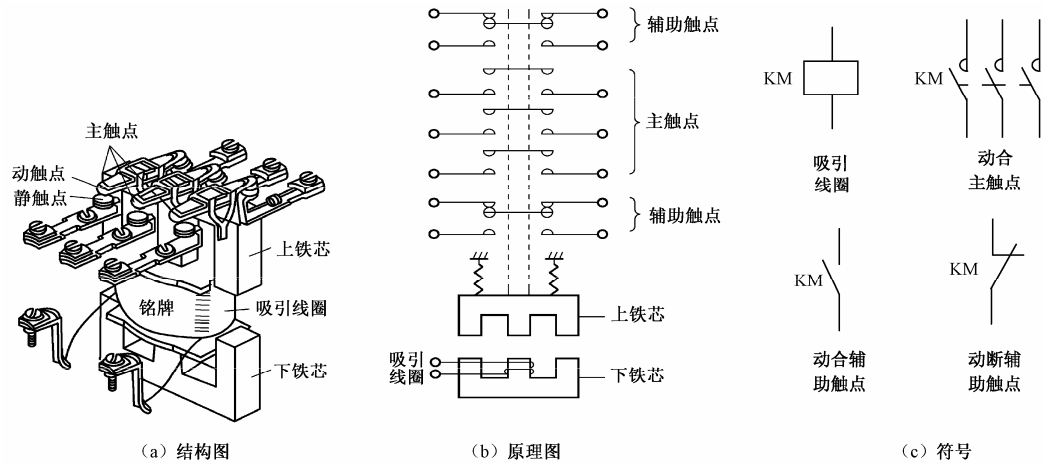


图 6-33　交流接触器

无论是主触点还是辅助触点，都因连接在动铁芯上而与其同步动作。当吸引线圈通电时，动铁芯克服复位弹簧作用力向静铁芯移动，拖动所有触点动作，其动断触点断开，动合触点闭合，从而完成电气设备所要求的控制。

交流接触器的吸引线圈中通过的是交流电，所以其铁芯中产生的磁通也是交变的，所产生的电磁吸力在磁通过零时为零，会引起电磁铁的铁芯在工作时发生振动，从而产生噪声，解决的方法是在铁芯部分端上嵌装短路环。若在实际应用中发现交流接触器工作时发出很大噪声，应重点检查短路环是否脱落、断裂。

6. 热继电器

热继电器是一种过载保护电器，它利用电流热效应原理工作，其结构主要由发热元件、双金属片和触点组成。热继电器的发热元件绕制在双金属片（两层膨胀系数不同的金属辗压而成）上，导板等传动机构设置在双金属片和触点之间，热继电器有动合、动断触点各一对。图 6-34（a）、（b）、（c）所示分别为热继电器的外形图、原理示意图和符号。

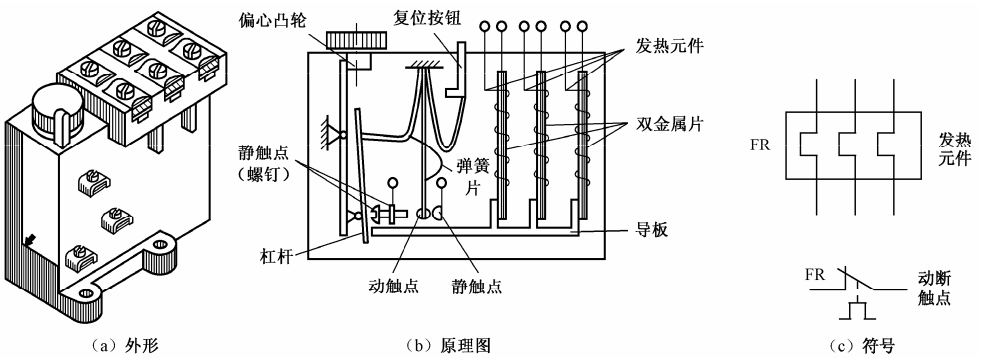


图 6-34　热继电器

热继电器的发热元件串联在被保护设备的电路中，当电路正常工作时，对应的负载电流流过发热元件产生的热量不足以使双金属片产生明显的弯曲变形；当设备过载时，负载电流增大，与它串联的发热元件产生的热量使双金属片产生弯曲变形，经过一段时间后，当弯曲程度达到一定幅度时，由导板推动杠杆，使热继电器的触点动作，其动断触点断开，动合触点闭合。

热继电器触点动作后，有两种复位方式：调节螺钉旋入时，双金属片冷却后动触点自动复位；调节螺钉旋出时，双金属片冷却后，动触点不能自动复位，必须按下复位按钮，才能使动触点实现手动复位。

热继电器的整定电流（发热元件长期允许通过而不致引起触点动作的电流最大值）可以通过调节偏心凸轮在小范围内调整。

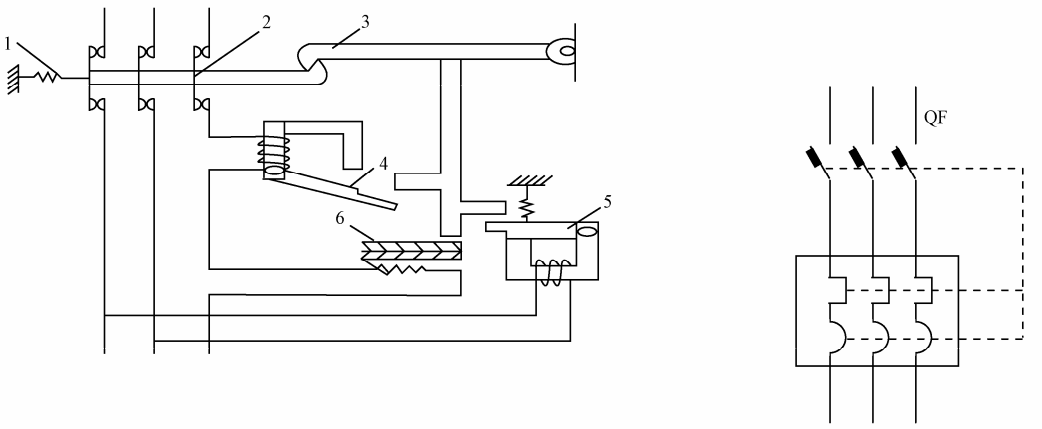
由于热惯性，双金属片从它通过大电流而温度升高，到双金属片弯曲变形，需要一定的时间，所以热继电器不适用于对电气设备（如电动机）实现短路保护。

7. 自动空气断路器

自动空气断路器又称为自动开关，是常见的一种低压保护电器，可以实现短路、过载和

欠压保护，在动作上相当于刀开关、熔断器和欠电压继电器的组合作用。它的结构形式很多，如图 6-35 所示为一般原理图和符号，它主要由触点、脱扣机构组成。主触点通常是由手动的操作机构来闭合的，开关的脱扣机构是一套连杆装置，当主触点闭合后就被锁钩扣住。

自动空气断路器利用脱扣机构使主触点处于“合”与“分”状态，正常工作时，脱扣机构处于“合”位置，此时触点连杆被搭钩锁住，使触点保持闭合状态；扳动脱扣机构置于“分”位置时，主触点处于断开状态，空气断路器的“分”与“合”在机械上是互锁的。



（a）原理示意图　　（b）符号

1—弹簧；2—触点；3—搭钩；4—过电流脱扣器；5—欠电压脱扣器； 6—热脱扣器

图 6-35　空气断路器

当被保护电路发生短路或严重过载时，由于电流很大，过流脱扣器的衔铁被吸合，通过杠杆将搭钩顶开，主触点迅速切断短路或严重过载的电路。当被保护电路发生过载时，通过发热元件的电流增大，产生的热量使双金属片弯曲变形，推动杠杆顶开搭钩，主触点断开，切断过载电路。过载越严重，主触点断开越快，但由于热惯性，主触点不可能瞬时动作。

当被保护电路失压或电压过低时，欠压脱扣器中衔铁因吸力不足而被释放，经过杠杆将搭钩顶开，主触点被断开；当电源恢复正常时，必须重新合闸后才能工作，实现了欠压和失压保护。

8. 时间继电器

时间继电器是一种利用电磁原理或机械原理来延迟触点闭合或分断的自动控制电器。它的种类很多，按其工作原理可分为电磁式、空气阻尼式、电子式、电动式；按延时方式可分为通电延时和断电延时两种。

图 6-36 所示为时间继电器的图形和文字符号。通常时间继电器上有好几组辅助触点，分为瞬动触点、延时触点。延时触点又分为通电延时触点和断电延时触点。所谓瞬动触点即是指当时间继电器的感测机构接受到外界动作信号后，该触点立即动作（与接触器一样），而通电延时触点则是指当接收输入信号（例如线圈通电）后，要经过一定时间（延时时间）后，该触点才动作。断电延时触点，则在线圈断电后要经过一定时间后，该触点才恢复。

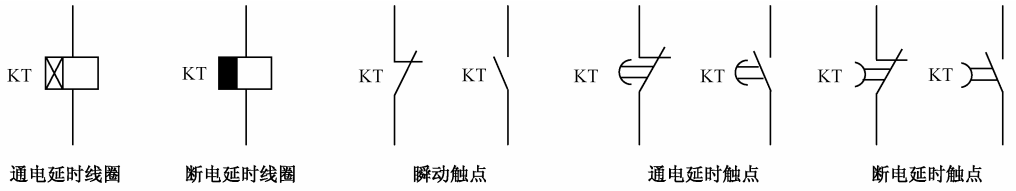
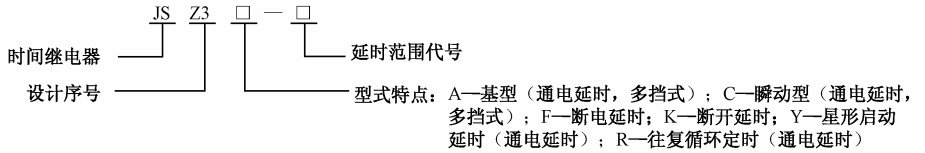


图 6-36　时间继电器的符号

本任务对电子式时间继电器进行介绍。电子式时间继电器具有体积小、延时范围大、精度高、寿命长以及调节方便等特点，目前在自动控制系统中的使用十分广泛。

以 JSZ3 系列电子式时间继电器为例。JSZ3 系列时间继电器是采用集成电路和专业制造技术生产的新型时间继电器，具有体积小、重量轻、延时范围广、抗干扰能力强、工作稳定可靠、精度高、延时范围宽、功耗低、外形美观、安装方便等特点，广泛应用于自动化控制中的延时控制。JSZ3 系列电子式时间继电器采用插座式结构，所有元件装在印制电路板上，用螺钉使之与插座紧固，再装上塑料罩壳组成本体部分，在罩壳顶部装有铭牌和整定电位器旋钮，并有动作指示灯。

其型号的含义如下：



JSZ3A 型延时范围：0.5s/5s/30s/3min。

JSZ3 系列时间继电器的性能指标有：电源电压：AC50Hz，12V、24V、36V、110V、220V、380V；DC12V、24V 等；电寿命：≥10×10^4 次；机械寿命：≥100×10^4 次；触点容量：AC220V/5A，DC220V/0.5A；重复误差：小于 2.5%；功耗：≤1W；使用环境：–15° C～+40° C。

JSZ3 系列时间继电器的接线如图 6-37 所示。

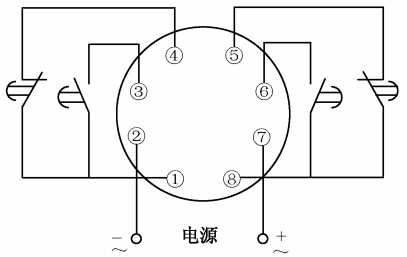


图 6-37　JSZ3 时间继电器接线图

电子式时间继电器在使用时，先预置所需延时时间，然后接通电源，此时红色发光管闪烁，表示计时开始。当达到所预置的时间时，延时触点实行转换，红色发光管停止闪烁，表示所设定的延时时间已到，从而实现定时控制。

6.3.2 三相异步电动机单向直接启动控制线路的分析与装配



知识链接 —— 学一学

用接触器和按钮来控制电动机的启停，用热继电器作为电动机过载保护，这就是继电—接触器控制的最基本电路。但工业用的生产机械，其动作是多种多样的，继电器—接触器控制电路也是多种多样的，各种控制电路都是在基本电路基础上，根据生产机械要求，适当增加一些电气设备。

生产中常遇到如下一些环节（基本电路）：点动控制；单向自锁运行控制；电动机正、反转互锁控制；负载的多地控制；时间控制等。这些控制环节也称为典型控制环节。一台比较复杂的设备，它的控制电路常包括几个典型环节，掌握这些典型环节，对分析、应用和设计控制电路是至关重要的。

电气控制线路的表示方法有两种：一种是电气安装图，一种是电气原理图。

安装图也称为电气装配图。它是根据电气设备和电气元件的实际结构和安装情况绘制的，用来表示接线方式、电气设备及电气元件位置、接线场所的形状、特征及尺寸。安装图是电力工程施工的主要图纸，它往往与平面布置图画在一起，便于电气线路的安装配线，这种图便于施工安装，但不能直观地表述电路的性能及工作原理，不便于阅读。

电气原理图是为了便于阅读与分析线路，根据简单、清晰的原则，采用电气元件展开的形式绘制而成的图样。它包括所有电气元件的导电部件和接线端点，但并不按照电气元件的实际布置位置来绘制，也不反映电气元件的大小。其作用是便于分析控制线路的工作原理，指导系统或设备的安装、调试与维修。在绘制电气原理图时应遵守如下规则：

① 原理图一般分主电路和辅助电路两部分。主电路就是从电源到电动机大电流通过的路径。辅助电路包括控制电路、照明电路、信号电路及保护电路等，由继电器和接触器的线圈、继电器的触点、接触器的辅助触点、按钮、照明灯、信号灯、控制变压器等元件组成。

② 控制系统内的全部电动机、电器和其他器件的带电部件，都应在原理图中表示出来。

③ 原理图中各电气元件不画实际的外形图，而采用国家规定的统一标准图形符号，文字符号也要符合国家标准规定。

④ 原理图中，各个电气元件和部件在控制线路的位置，应根据便于阅读的原则安排。同一元器件的各个部件可以不画在一起，但它们的动作是关联的。例如，接触器、继电器的线圈和触点可以不画在一起。但同一元器件的各部件必须标以相同的文字符号，为了便于分析其下标可以不同。对于同一电路中几个同类电器，则用不同数字同一文字符号表示。

⑤ 图中元件、器件和设备的可移动部分，都按没有通电和没有外力作用时的开闭状态画出。例如，继电器、接触器的触点，按吸引线圈不通电状态画；主令控制器、万能转换开关，按手柄处于零位时的状态画；按钮的触点，按不受外力作用时的状态画等。

⑥ 原理图的绘制布局合理，排列均匀。为了便于看图，可以水平布置，也可以垂直布置。

⑦ 电气元件应按功能布置，并尽可能按水平顺序排列，其布局顺序应该是从上到下，从左到右。电路垂直时，类似项目宜横向对齐；水平布置时，类似项目应纵向对齐。

⑧ 电气原理图中，有直接联系的交叉导线连接点，要用黑圆点表示；无直接联系的交叉

导线连接点，不画黑圆点。

1. 三相异步电动机的点动控制线路分析与装配

生产机械不仅需要连续运转，有的生产机械还需要点动运行，还有的生产机械要求用点动运行来完成调整工作。所谓点动控制就是按下按钮，电动机通电运转，松开按钮，电动机断电停转的控制方式。

用按钮和接触器组成的单向点动控制电动机原理图，如图 6-38 所示。

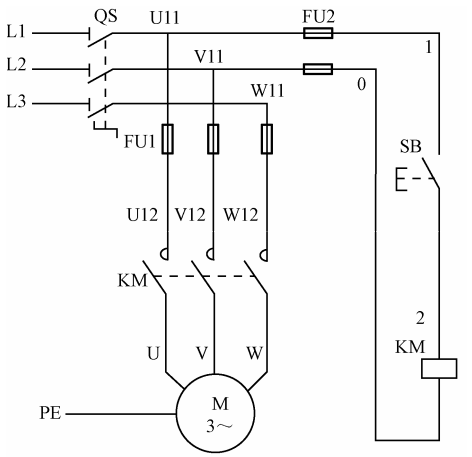


图 6-38　电动机单向点动控制原理图

原理图分为主电路和控制电路两部分。主电路是从电源 L1、L2、L3 经电源开关 QS、熔断器 FU、接触器 KM 的主触点到电动机 M 的电路，流过它的电流较大。熔断器 FU2、按钮 SB 和接触器 KM 的线圈组成控制电路，接在线路 U11 和 V11 间，流过的电流较小。

主电路中刀开关 QS 起隔离作用，熔断器 FU1 对主电路进行短路保护；接触器 KM 的主触点控制电动机 M 的启动、运行和停车。由于线路所控制电动机只作短时间运行，且操作者在近处监视，一般不设过载保护环节。

当需要电路工作时，首先合上电源开关 QS，按下点动按钮 SB，接触器 KM 线圈通电，衔铁吸合，带动它的三对主触点 KM 闭合，电动机 M 接通三相电源启动正转。当 SB 按钮放开后，接触器 KM 线圈失电，衔铁受弹簧拉力作用而复位，带动三对主触点断开，电动机 M 断电停转。

2. 三相异步电动机的单向运行控制电路（启停控制电路）

前面介绍的点动控制电路不便于电动机长时间动作，所以不能满足许多需要连续工作的状况。电动机的连续运转也称为长动控制，是相对点动控制而言的，它是指在按下启动按钮启动电动机后，松开按钮，电动机仍然能够通电连续运转。实现长动控制的关键是在启动电路中增设了“自锁”环节。用按钮和接触器组成的单向长动控制线路原理图，如图 6-39 所示。

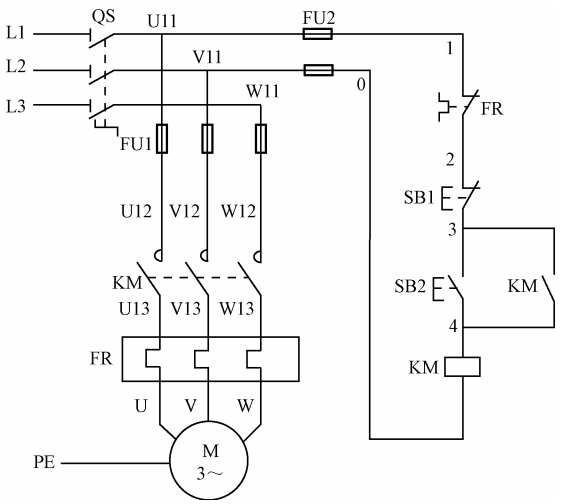


图 6-39　电动机单向长动控制原理图

工作过程如下：合上电源开关 QS，按下启动按钮 SB2，交流接触器 KNM 线圈得电，与 SB2 并联的 KM 常开辅助触点闭合，使接触器线圈有两条电路通电。这样即使 SB2 松开，接触器 KM 的线圈仍可通过自己的辅助触点（称为“自保”或“自锁”触点，触点的上、下连线称为“自保线”或“自锁线”）继续通电。这种依靠接触器自身辅助触点而使线圈保持通电的现象称为自保（或自锁）。

在带自锁的控制电路中，因启动后 SB2 即失去控制作用，所以在控制回路中串接了常闭按钮 SB1 作为停止按钮。另外，因为该电路中电动机是长时间运行的，所以增设了热继电器 FR 进行过载保护。FR 的常闭触点串接在 KM 的电磁线圈回路上。

自锁（自保）控制的另一个作用是实现欠压和失压保护。例如当电网电压消失（如停电）后又重新恢复供电时，若不重新按启动按钮，电动机就不能启动，这就构成了失压保护。它可防止在电源电压恢复时，电动机突然启动而造成设备和人身事故。另外，当电网电压较低时，达到接触器的释放电压，接触器的衔铁就会释放，主触点和辅助触点都断开。它可防止电动机在低压下运行，实现欠压保护。

3. 电气控制线路图的装配与调试方法

（1）分析电气原理图

电动机的电气原理图反映了控制线路中电气元件间的控制关系。在安装电动机电气控制线路前，必须明确电气元件的数目、种类、规格；根据控制要求，弄清各电气元件间的控制关系及连接顺序；分析控制动作，确定检查线路的方法等。对于复杂的控制电路，应弄清它由哪些控制环节组成，分析环节之间的逻辑关系。

（2）检查电气元件

为了避免电气元件自身的故障对线路造成的影响，安装接线前应对所有的电气元件逐个进行检查。

① 外观检查。外壳是否完整，有无碎裂；各接线端子及紧固件是否齐全，有无生锈等现象。

② 触点检查。触点有无熔焊、粘连、变形、严重氧化锈蚀等现象；触点动作是否灵活；

触点的开距是否符合标准；接触压力弹簧是否有效。

③ 电磁机构和传动部件检查。动作是否灵活；有无衔铁卡阻、吸合位置不正常等现象；衔铁压力弹簧是否有效等。

④ 电磁线圈检查。用万用表检查所有电磁线圈是否完好，并记录它们的直流电阻值，以备检查线路和排除故障时作为参考。

⑤ 其他功能元器件的检查。主要检查时间继电器的延时动作、延时范围及整定机构的作用；检查热继电器的热元件和触点的动作情况。

⑥ 核对各元器件的规格与图样要求是否一致。

（3）固定电气元件

按照接线图规定的位置将电气元件固定在安装底板上。元件之间的距离要适当，既要节省面板，又要便于走线和投入运行后检修。

（4）配线

电器控制板安装配线时通常采用明配线，即板前配线。一般从电源端开始按线号顺序接线，先接主电路，后接辅助电路。配线的方法如下：

① 选择适当的导线截面，截取合适长度，剥去两端绝缘外皮。

② 走线时应尽量避免交叉。将同一走向的导线汇成一束，依次弯向所需的方向。走线应做到横平竖直、拐直角弯。

③ 将成形好的导线套上写好线号的线号管，根据接线端子的情况，将芯线弯成圆环或直接压进接线端子。

（5）检查线路和试车

① 检查线路。制作好的控制线路必须经过认真检查后才能通电试车，以防止错接、漏接及电气故障引起线路动作不正常，甚至造成短路事故。检查时先核对接线，然后检查端子接线是否牢固，最后用万用表导通法来检查线路的动作情况及可靠性。

② 试车与调整。试车前的准备：清点工具，清除线头杂物，装好接触器的电弧罩，检查各组熔断器的熔体，分断各开关使各开关处于未操作状态，检查三相电源的对称性等。

空操作试验：先切断主电路（断开主电路熔断器），装好辅助电路熔断器，接通三相电源，使线路不带负荷通电操作，以检查辅助电路工作是否正常。操作各按钮检查它们对接触器、继电器的控制作用；检查接触器的自保、联锁等控制作用；用绝缘棒操作行程开关，检查它的行程控制或限位控制作用；检查线圈有无过热现象等。

带负荷试车：空操作试验动作无误后，即可切断电源，接通主电路，然后再通电，带负荷试车。启动后要注意它的运行情况，如发现过热等异常现象，应立即停车，切断电源后进行检查。

其他调试：如定时运转线路的运行和间隔时间，Y-△启动线路的转换时间，反接制动线路的终止速度等。应按照各线路的具体情况确定调试步骤。



实践操作 —— 做一做

（1）三相异步电动机点动控制线路的装配

按图 6-38 所示线路接线。接线应按照主电路、控制电路分步来接，接线次序应按自上而

下、从左向右来接。接线要整齐、清晰，接点牢固可靠。电动机采用星形接法。接线完毕须经指导教师检查线路后通电运行，按下启动按钮 SB，观察电动机转动情况；松开按钮 SB，观察电动机的转动情况。

（2）三相异步电动机直接控制线路的装配

按图 6-40 所示线路接线。电动机采用星形接法。接线完毕须经指导教师检查线路后通电运行，按下启动按钮 SB2，观察电动机转动情况；松开按钮 SB2，观察电动机的转动情况；按下停止按钮 SB1，观察电动机是否停止。

应注意：接线时避免将导线的金属部分裸露在外，也不能将绝缘部分压在接线片内。线路接好后，必须仔细认真地检查并经指导教师检查后，才能通电运行。



问题研讨 —— 想一想

（1）除了教材中的低压电器，请自己查阅资料学习其他低压电器（如中间继电器），并说明其作用。

（2）查阅资料，时间继电器还有什么类型？与教材中所介绍的时间继电器有何不同？

（3）常用低压电器（如按钮、交流接触器、热继电器、自动空气断路器等）在使用中有哪些常见故障？可能的原因是什么？如何检修和排除？

（4）图 6-39 中已用了热继电器，为什么还要装熔断器？是否重复了？热继电器、熔断器在线路中各起什么作用？

（5）为什么凡是用接触器和按钮控制电动机运行的线路，都具有失压保护作用？根据是什么？

6.3.3 三相异步电动机正、反转控制线路的分析与装配



知识链接 —— 学一学

在生产过程中，很多生产机械的运行部件都需要正、反两个方向运动，如水闸的开、闭，机床工作台的前进、后退等。要使三相异步电动机正、反转，只要改变引入到电动机的三相电源相序即可。用倒顺开关能实现异步电动机的正、反转，但它不能实现遥控和自控。

1. 接触器互锁的正、反转控制线路分析

用两个接触器也能改变引入到电动机的电源相序，如图 6-40 所示。若正转接触器 KM1 工作（主触点闭合）电动机正转，反转接触器 KM2 工作就反转。问题是若两个接触器同时工作，则有两根电源线被主触点短接，所以对正、反转控制电路的最基本的要求是两个接触器不能同时工作。因此就要对两个接触器进行“互锁”，就是当一个接触器工作时，要锁住另一个接触器，为此在正转接触器 KM1 的线圈电路中串接一个反转接触器 KM2 的动断辅助触点 $KM2_3$，而在反转接触器 KM2 的线圈电路中接一个正转接触器 KM1 的动断辅助触点 $KM1_3$，其控制线路如图 6-40 所示，这两个动断辅助触点称之为互锁触点。

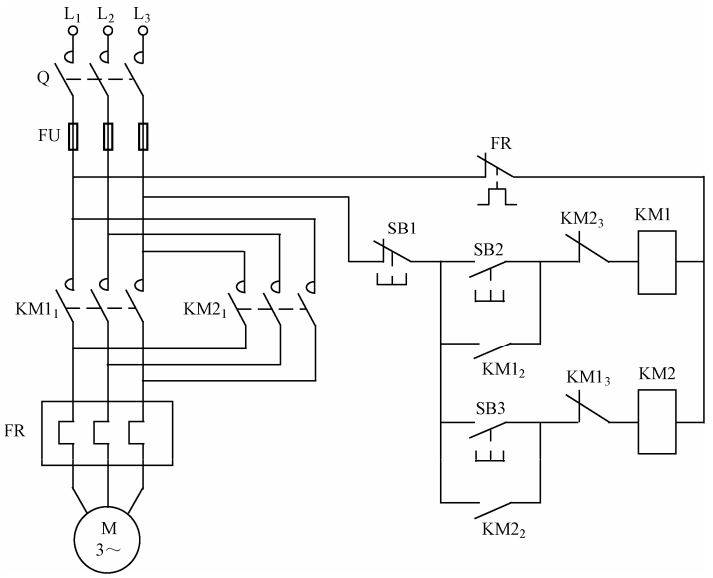


图 6-40　用两个接触器的正反转控制电路

动作过程如下。

正转控制：先合电源刀开关 Q，再按正转按钮 SB2，正转接触器 KM1 线圈通电，①KM1 动合辅助触点 $KM1_2$ 闭合，实现自锁；②KM1 主触点 $KM1_1$ 闭合，电动机正转；③KM1 动断辅助触点 $KM1_3$ 断开实现互锁（使反转接触器 KM2 线圈回路处于开路状态）。

反转控制：先按停止按钮 SB1，使正转接触器 KM1 线圈失电，主、辅触点复位。然后再按反转按钮 SB3，反转接触器 KM2 线圈通电，①KM2 动合辅助触点 $KM2_2$ 闭合实现自锁；②KM2 主触点 $KM2_1$ 闭合而改变引入到电动机的电源相序，电动机反转；③KM2 动断辅助触点 $KM2_3$ 断开实现互锁（使正转接触器 KM1 线圈回路处于开路状态）。

接触器互锁正、反转控制电路优点是可以避免由于误操作以及因接触器故障引起电源短路的事故发生，但存在的主要问题是，从一个转向过渡到另一个转向时要先按停止按钮 SB3，不能直接过渡，显然这是十分不方便的。可见接触器互锁正、反转控制电路的特点是安全但不方便，运行状态转换必须是“正转→停止→反转”。

2. 双重互锁的正、反转控制线路分析

采用复式按钮和接触器复合互锁的正、反转控制电路如图 6-41 所示，它可以克服上述两种正、反转控制电路的缺点，图中，SB2 与 SB3 是两只复合按钮，它们各具有一对动合触点和一对动断触点，该电路具有按钮和接触双重互锁作用。

按钮互锁是通过复合按钮实现的，图 6-41 中所示连接按钮的虚线表示同一按钮相互联动的触点，其中，正转按钮 SB2 的动合触点用来控制正转接触器 KM1 线圈通电，动断触点串接在反转接触器 KM2 线圈电路中，当按下 SB2 接通正转控制回路的同时，断开了它的动触点，切断了反转控制回路，保证了 KM2 线圈不会得电。反转按钮 SB3 的动合触点用来控制反转接触器 KM2 线圈通电，动断触点串接在正转接触器 KM1 线圈电路中，当按下 SB3 接通反转控制回路的同时，断开了它的动断触点，切断了正转控制回路，保证了 KM1 线圈不会得电，从而实现了机械互锁。

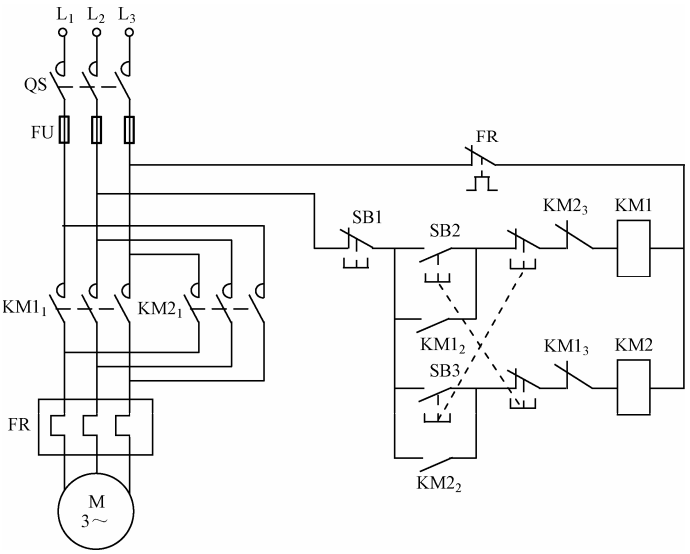


图 6-41　接触器和按钮双重联锁的电动机正、反转控制线路原理图

接触器互锁与上面控制电路相同，是通过两个动断辅助触点 $KM1_3$、$KM2_3$ 分别串接在对方接触器线圈所在支路来实现的。

其动作过程如下：合上电源刀开关 QS。正转时，按正转按钮 SB2，正转接触器 KM1 线圈通电，KM1 主触点 $KM1_1$ 闭合，电动机正转。与此同时，SB2 的动断触点和 KM1 的互锁动断触点 $KM1_3$ 都断开，双双保证反转接触器 KM2 线圈不会同时获电。

欲要反转，可直接按下反转复合按钮 SB3，其动断触点先断开，使正转接触器 KM1 线圈断电，KM1 的主、辅触点复位，电动机停止正转。与此同时，SB3 动合触点闭合，使反转接触器 KM2 线圈通电，KM2 主触点 $KM2_1$ 闭合，电动机反转，串接在正转接触器 KM1 线圈电路中的 KM2 动断辅助触点 $KM2_3$ 断开，起到互锁作用。

在鼠笼式异步电动机的直接启动控制设备中，磁力启动器用途很广泛。磁力启动器实质上是由交流接触器和热继电器组合而成的启动控制设备，它有不可逆的和可逆的两种，前者用于单向运行控制电路，后者用于正、反转控制电路。磁力启动器用于直接启动容量在 7.5kW 以下的鼠笼式异步电动机。



实践操作 —— 做一做

按图 6-41 所示电路接线。接线完毕须经指导教师检查线路后通电运行。按下启动按钮 SB2，观察电动机转动情况；按下 SB1 让电动机停转。按下启动按钮 SB3。按下启动按钮 SB2→再按下启动按钮 SB3，观察与按下 SB2→按下 SB1→按下 SB3 时电动机转动情况，是否实现了正、反转控制。



问题研讨 —— 想一想

试设计由按钮控制的三相异步电动机正、反转控制线路，并简述其控制过程。

6.3.3　三相异步电动机 Y-△换接降压启动控制线路的分析与装配

知识链接 —— 学一学

某些生产机械的控制电路需要按一定的时间间隔来接通或断开某些控制电路，如三相异步电动机的 Y-△换接降压启动，就需采用时间继电器来实现延时控制。

图 6-42 所示是用时间继电器控制的三相鼠笼式异步电动机的 Y-△换接降压启动控制电路。图中 KT 是通电延时时间继电器，其中一个是延时断开的动断触点 KT_1，一个是延时闭合的动合触点 KT_2，KM2 是控制电动机 Y 形连接的接触器，KM3 是控制电动机△形连接的接触器。

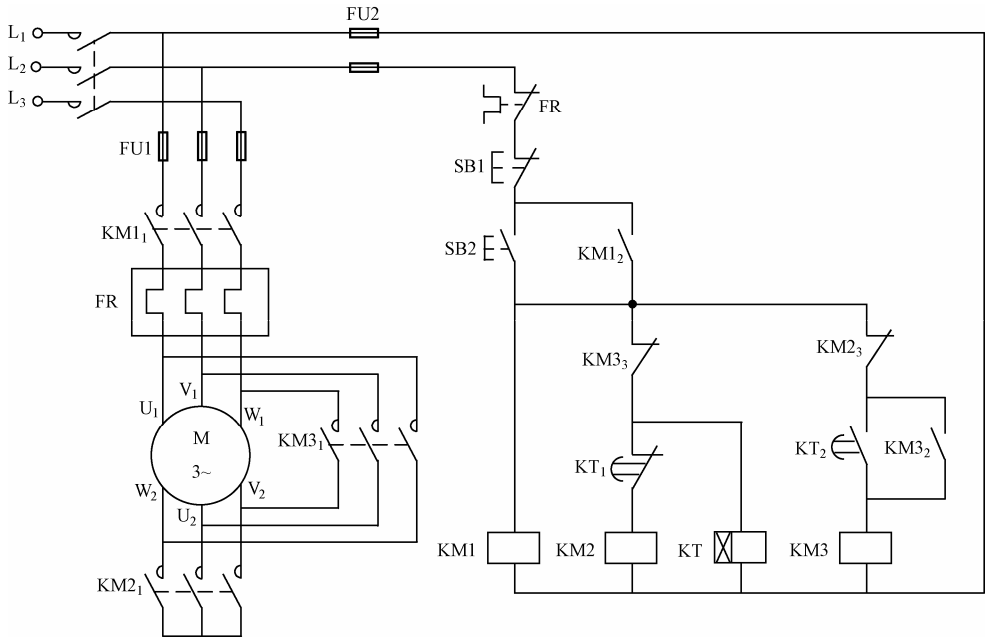


图 6-42　三相鼠笼式异步电动机 Y-△换接降压启动控制电路

合上电源开关 QS，按下启动按钮 SB2，使 KM1、KM2、KT 线圈通电，KM1、KM2 主触点 $KM1_1$、$KM2_1$ 闭合，同时 KM2 的动断触点 $KM2_3$ 断开，保证 KM3 的线圈不能获电，电动机便在 Y 形连接情况下启动。经过一定的延时间隔，KT 时间继电器的延时断开的动断触点 KT_1 断开，KM2 线圈失电。其结果：①KM2 主触点 $KM2_1$ 断开，解除电动机 Y 形连接；②KM2 动断触点 $KM2_2$ 闭合，KT 延时闭合的动合触点 KT_2 闭合，KM3 的线圈通电，KM3 的主触点 $KM3_1$ 闭合，电动机便在△形连接的情况下运行；③KM3 的动断触点 $KM3_3$ 断开，保证 KM2 线圈不能获电。

实践操作 —— 做一做

按图 6-42 所示电路接线，时间继电器的整定时间设置为 5s。接线完毕须经指导教师检查

线路后通电运行。按下启动按钮 SB_2，观察各交流接触器、时间继电器的吸合情况和三相电动机转动情况。5s 后观察各交流接触器、时间继电器的吸合情况和三相电动机转动情况。按下启动按钮 SB_1，观察电动机转动情况和交流接触器、时间继电器的吸合情况。

问题研讨 —— 想一想

试设计由按钮控制的三相异步电动机 Y-△换接降压启动控制线路，并简述其控制过程。

任务 6.4　单相异步电动机的认知与使用

任务描述

单相异步电动机是用单相交流电源供电的异步电动机。这种电动机结构简单，使用方便，只需单相电源。它不仅在工、农业生产各行业上为微型机械提供动力，而且家用电器也都用它来拖动，它是一种重要的微型电动机，其容量从几瓦到几百瓦。本任务学习单相异步电动机的结构、运转原理与使用。

任务目标

熟悉单相异步电动机的结构；理解工作原理、启动方法；掌握单相异步电动机的使用方法。

任务实施

知识先导 —— 认一认

观察图 6-43 所示的单相异步电动机的主要零部件。

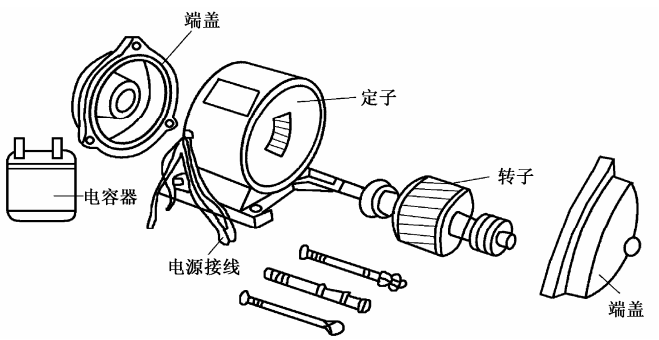


图 6-43　单相异步电动机的结构

知识链接 —— 学一学

在只有单相交流电源或负载所需功率较小的场合，如电风扇、电冰箱、洗衣机、医疗器械及某些电动工具上，常采用单相异步电动机。

6.4.1　单相异步电动机的工作原理

1. 单相异步电动机的结构

单相异步电动机的构造与三相鼠笼式异步电动机相似，它的转子也是鼠笼式，而定子绕组是单相的，单相异步电动机的结构，如图 6-41 所示。

2. 单相异步电动机的工作原理

当定子绕组通入单相交流电时，便产生一个交变的脉动磁通，这个磁通的轴线在空间是固定的，但可分解为两个等量、等速而反向的旋转磁通，如图 6-44 所示。

转子不动时，这两个旋转磁通与转子间的转差相等，分别产生两个等值而反向的电磁转矩，净转矩为零。也就是说，单相异步电动机的启动转矩为零，这是它的主要缺点之一。

如果用某种方法使转子旋转一下，譬如说，使它顺时针方向转一下，那么，这两个旋转磁通与转子间的转差不相等，转子将会受到一个顺时针方向的净转矩而持续地旋转起来。

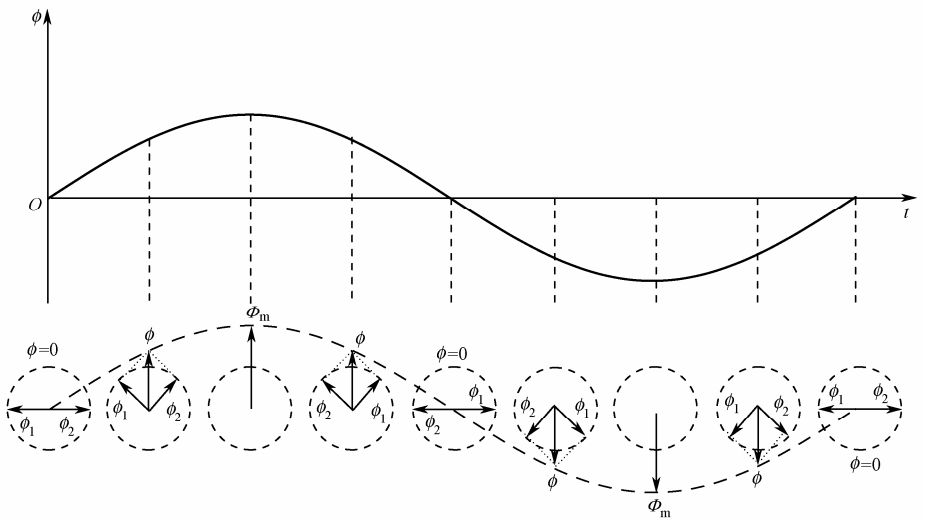


图 6-44　脉动磁通分解为两个旋转磁通的图示

6.4.2 单相异步电动机的启动和反转

1. 电容分相法启动

（1）旋转磁场的产生

从单相异步电动机的工作原理分析可知，单相异步电动机如果只有一套绕组，则没有启动转矩，无法自行启动，其根本原因是气隙中没有形成旋转磁场。因此，要解决单相异步电动机工作问题，首先必须解决启动问题，那就得在气隙中建立旋转磁场，要建立旋转磁场，定子必须安放两相参数相同的绕组 U_1–U_2 和 V_1–V_2，且在空间相差 90° 电角度，称为两相对称绕组，如图 6-45（b）所示。若在该两相绕组中通以大小相等、相位相差 90° 电角度的对称电流，即，$i_U=I_m\sin\omega t$ 通入 U_1–U_2 中，$i_V=I_m\sin(\omega t-90°)$ 通入 V_1–V_2 中。两相对称电流波形如图 6-45（a）所示，两相对称电流在两相绕组中产生旋转磁场的过程如图 6-45 所示。

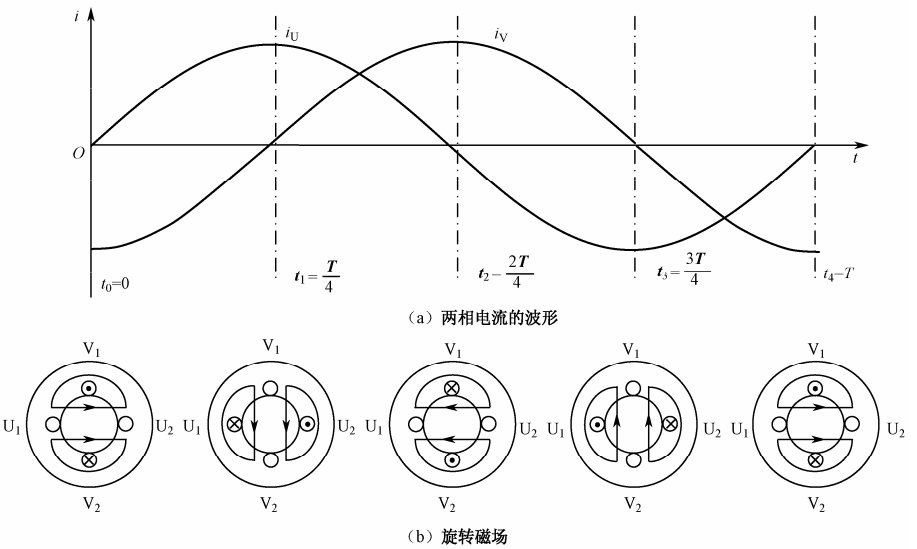


图 6-45　互差 $\frac{\pi}{2}$ 的两相电流的旋转磁场

从图 6-45 可见，在空间相差 90° 的两相对称绕组中，通入互差 90° 的两相交流电流，结果产生了旋转磁场。旋转磁场的转速为 $n=60f_1/p$，旋转磁场的幅值不变，这样的旋转磁场与三相异步电动机旋转磁场的性质相同（圆形旋转磁场）。用同样的方法可以分析得出，当主绕组和启动绕组中不对称或两相电流不对称时，如两相磁势不相等，即 $I_UN_U\neq I_VN_V$，或两相电流之间的相位差不等于 90° 电角度时，气隙中只能产生一个椭圆形旋转磁场，一个椭圆形磁场可以分解成两个大小不相等、转向相反、转速相同的圆形旋转磁场，如图 6-46 所示。

（2）电容分相式单相异步电动机

电容分相式单相异步电动机定子上有两个绕组，一个称为主绕组（或称为工作绕组），另一个为启动绕组（或称为辅助绕组），两绕组在空间相差 90°，如图 6-48 所示，启动绕组与电容器串联，启动时，利用电容器使启动绕组的电流在相位上比主绕组的电流导前近 90°。换言之，由于启动绕组串联了电容器，使得在单相电源作用下，在两绕组中形成了两相电流，在气隙中形成了旋转磁场，产生了启动转矩。

如图 6-47 所示，启动时，主绕组电路与启动绕组电路中的两只开关 QS 和 S 都要闭合，

等到转速接近额定值时，启动绕组电路中的“离心开关”S 自动断开，这时只留下主绕组，电动机仍可继续带动负载运转。

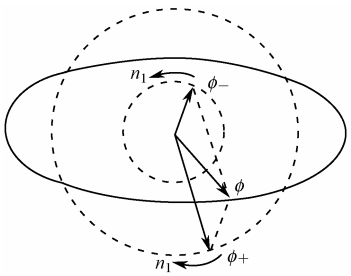


图 6-46　椭圆形旋转磁场的分解图

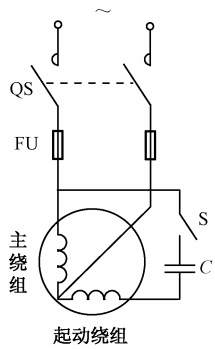


图 6-47　电容分相式电动机接线图

2. 罩极法启动

容量很小的单相异步电动机常利用罩极法来产生启动转矩。它的定子、转子铁芯采用 0.5mm 厚的硅钢片叠压而成。单相绕组套在磁极上，极面的一边开有小凹槽，凹槽将每个磁极分成大、小两部分，较小的部分（约 1/3）套有铜环，称为被罩部分；较大的部分未套铜环，称为未罩部分，如图 6-48 所示。

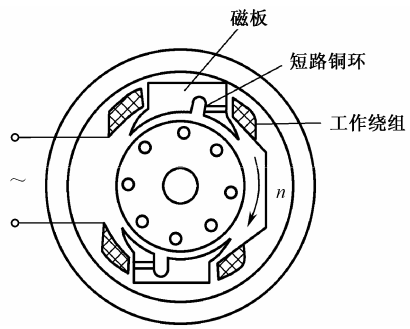


图 6-48　罩极式单相异步电动机的结构图

罩极式电动机的磁场具有移动的性质，这可用图 6-49 来说明。当单相绕组（主线圈）的电流和磁通由零值增大时，在铜环中引起感应电流，它的磁通方向应与磁极磁通反向，致使磁极磁通穿过被罩部分的较疏，穿过未罩部分的较密，如图 6-49（a）所示。

当主线圈电流升到最大值附近时，电流及其磁通的变化率近似为零，这时铜环内不再有感应电流，亦不再有反抗的磁通，铜环失去作用，此时磁极的磁通均匀分布于被罩和未罩两部分，如图 6-49（b）所示。

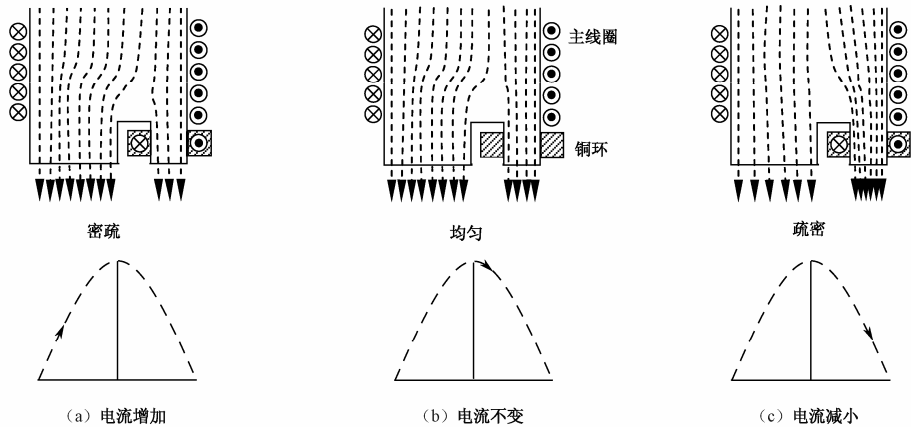


图 6-49　罩极式电动机的磁场移动原理

当主线圈电流从最大值下降时，铜环内又有感应电流，这时它的磁通应与磁极磁通同向，因而被罩部分磁通较密，未罩部分磁通较疏，如图 6-49（c）所示。

由图 6-49（a）、（b）、（c）看出，罩极式磁极的磁通具有在空间移动的性质，由未罩部分移向被罩部分。当主线圈电流为负值时，磁通的方向相反，但移动的方向不变，所以不论单相绕组中的电流方向如何变化，磁通总是从未罩部分移向被罩部分。这种持续移动的磁场，其作用与旋转磁场相似，也可以使转子获得启动转矩。

要改变罩极式单相异步电动机的旋转方向，只能改变罩极的方向，这一般难以实现，所以单相罩极式异步电动机通常用于不需改变转向的电气设备中。

单相异步电动机的优点是可用于单相电源；缺点是效率、功率因数、过载能力都比较低，而且造价比同容量的三相异步电动机要高。因此单相异步电动机的容量一般在 1kW 以下。

3　单相异步电动机的反转

对电容分相式单相异步电动机，在要求改变旋转方向时，一般的方法是：将主绕组（或者副绕组）的两出线端对调，就会改变旋转磁场的转向，从而使电动机的转向得到改变。

如果要求电动机频繁正、反向转动，例如，家用洗衣机的搅拌用电动机，运行中一般 30s 左右必须改变一次转向，此电动机一般用的是电容运转式单相电动机，其主绕组、启动绕组做得完全一样，通过转换开关，将电容器分别与主绕组、启动绕组串联，即可方便地实现电动机转向的改变，如图 6-50 所示。对其他类型的单相异步电动机的反转方法，请参阅有关资料。

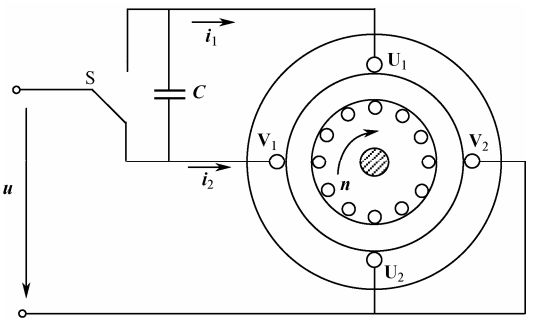


图 6-50　电容运转式电动机的正、反转

6.4.3　单相异步电动机的调速

单相异步电动机的调速方法有变极调速、降压调速（又分为串联电抗器、串联电容器、自耦变压器和串联晶闸管调压调速方法）、抽头调速等。电风扇用电动机调速方法目前常用串电抗器法和抽头调速法。

（1）串电抗器调速法

串电抗器调速法是将电抗器与电动机定子绕组串联。通电时，利用在电抗器上产生的电压降使加到电动机定子绕组上的电压低于电源电压，从而达到降压调速的目的。因此用串电抗器调速法时，电动机的转速只能由额定转速向低调速。这种调速方法的优点是线路简单，

操作方便；缺点是电压降低后，电动机的输出转矩和功率明显降低，因此只适用于转矩及功率都允许随转速降低而降低的场合。下面以吊扇调速为例进行说明。

吊扇电动机又称吊头，多数采用单相交流电容分相式电动机，封闭式外转子结构。其结构特点是定子固定在电动机中间，外转子绕定子旋转，从而带动与之连接的扇头和外壳一起转动。

吊扇的调速采用调速器实现，其电路图如图 6-51（a）所示，图中副绕组与电容器串联，然后与主绕组并联到电源另一端，调速时通过调整电抗式调速线圈抽头来改变速度。调速旋钮控制开关的动触点，可分别接通调速电抗器的五个抽头的静触点，利用串入电抗器线圈匝数不同来改变电动机的端电压，从而得到不同的转速。若将调速旋钮置于“停”位置，电动机因绕组断电而停转。

图 6-51（b）所示为吊扇电气接线示意图，黑色引出线所连接的是副绕组，红色引出线连接的是主绕组，绿色引出线连接的是主、副绕组公共端，它直接接到电源另一端。

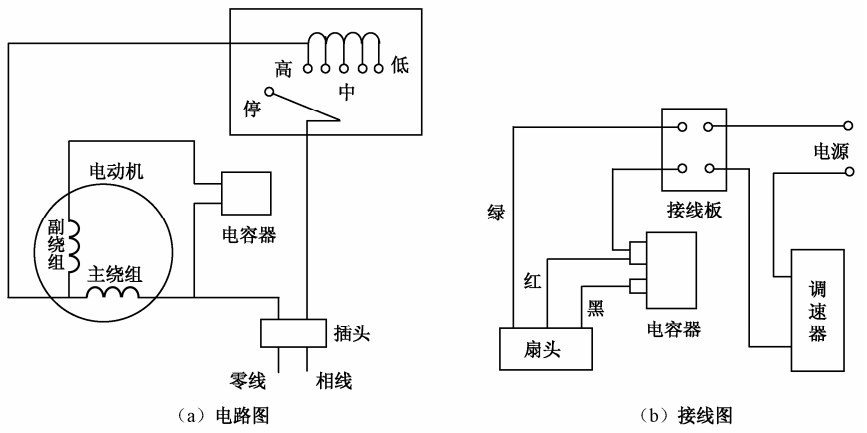


图 6-51　吊扇电气原理图和接线图

串电抗器调速法，电动机的转速只能由额定转速向低调速。这种调速方法的优点是线路简单，操作方便；缺点是电压降低后，电动机的输出转矩和功率明显降低，因此只适用于转矩及功率都允许随转速降低而降低的场合。

（2）电动机绕组抽头调速法

电容运转电动机在调速范围不大时，普遍采用定子绕组抽头调速。此时定子槽中嵌有工作绕组、启动绕组和调速绕组（又称中间绕组），通过改变调速绕组与工作绕组、启动绕组的连接方式，调节气隙磁场大小及椭圆度来实现调速的目的，如台扇调速。

台扇一般采用电容分相式电动机的抽头调速，实质上是电抗器与定子绕组制造在一起，通过改变定子绕组的接法实现调速。这种方法不用电抗器，仅在定子绕组中增加一个调速辅助绕组，称中间绕组或调速绕组。

台扇电气接线如图 6-52（a）所示，电动机主绕组（运行绕组）、副绕组（启动绕组）以及中间绕组（调速绕组）接线如图 6-52（b）所示。

电动机绕组抽头调速与串电抗器调速比较，用绕组内部抽头调速不需电抗器， 故节省材料、耗电量少，但绕组嵌线和接线比较复杂。

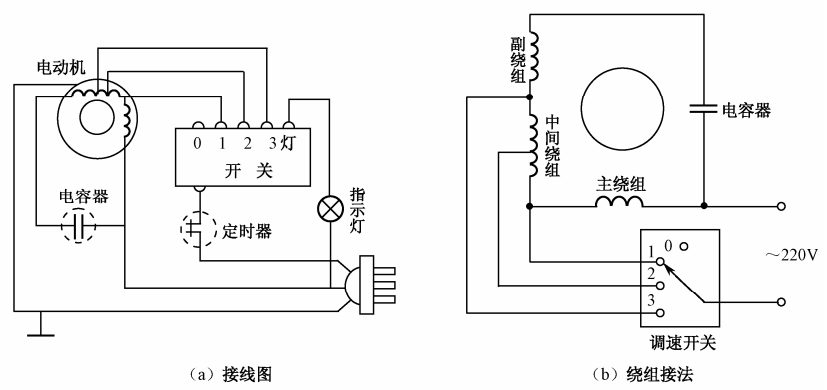


图 6-52　台扇电气接线图



问题研讨 —— 想一想

（1）单相异步电动机为什么不能自行启动？可是外力推动一下，它就转动起来，这是为什么？

（2）三相异步电动机在运行过程中，如一相断开，电动机仍能运行，试分析这种现象的原因。在实际工作中是否允许三相异步电动机工作在这种状态？为什么？

（3）查找家用电器中的单相异步电动机控制线路图，分析所查找的家用电器中的单相异步电动机控制线路图。

项目小结

1．电动机是将电能转换为机械能的旋转电气设备，基本结构主要分为两部分：定子和转子。这两部分之间由气隙隔开。转子按结构形式不同，分为鼠笼式和绕线式异步电动机，前者结构简单，价格便宜，运行、维护方便，使用广泛。后者启动、调速性能好，但结构复杂，价格高。

2．异步电动机又称感应电动机，它的转动是依据电生磁，磁生电，电磁力（矩）而运转的；转子感应电流（有功分量）在旋转磁场作用下产生电磁力并形成转矩，驱动电动机旋转。

转子转速 n 恒小于旋转磁场转速 n_1，即转差的存在是异步电动机旋转的必要条件。转子转向与旋转磁场方向（即三相电流相序）一致，这是异步电动机改变转向的原理。转差率实质上是反映转速快慢的一个物理量。

3．三相异步电动机的电磁转矩的参数表达式为 $T=c'_{\mathrm{T}}U_1^2\dfrac{sR_2}{R_2^2+(sX_{20})^2}$，由此可描绘异步电动机的转矩特性曲线和机械特性曲线，它们是分析异步电动机运行性能的依据。

额定转矩与额定功率的关系为 $T_{\mathrm{N}}=9550\dfrac{P_{\mathrm{N}}}{n_{\mathrm{N}}}$；运行中电网电压波动对电磁转矩影响很大，电磁转矩与电源电压的二次方成正比，即 $T\propto U^2$。

4．三相异步电动机启动电流大而启动转矩小。对稍大容量异步电动机为限制启动电流，常用降压（Y-△换接、自耦变压器降压）启动。降压启动在限制启动电流的同时，也限制了

本来就不大的启动转矩，故它只适用于空载或轻载启动。绕线式异步电动机用在转子回路串电阻启动，它能减小启动电流又能增大启动转矩。

鼠笼式异步电动机的调速方法有：变极调速——属有级调速，变频调速——属无级调速；绕线式异步电动机采用改变转差率调速，通常是在转子回路中串接可变电阻。

三相异步电动机的能耗制动是将三相绕组脱离交流电源，把直流电接入其中两相绕组，形成恒定磁场而产生制动转矩；反接制动是改变电流相序形成反向旋转磁场而产生制动转矩；回馈制动是借助于外界因素，使电动机转速 n 大于旋转磁场转速 n_1，致使由电动状态变为发电状态而产生制动转矩。

5．常用低压电器种类繁多，可分成如下三类。

开关类：主要有开启式开关、封闭式开关、按钮开关等，其任务是接通或分断电路，发出命令。

保护类：主要有熔断器、自动空气断路器、热继电器，其任务是保证电气控制电路正常工作，防止事故的发生。

控制类：主要有接触器、时间继电器，其任务是按照开关和保护类电器发出的命令，控制电气设备正常工作。

6．任何一个复杂的控制系统均是由一些基本的控制环节（电路）组成再加上一些特殊要求的控制电路。在三相异步电动机基本控制电路中，本项目介绍了点动、单向自锁运行控制，正、反转互锁控制，Y-△降压启动及短路、过载、欠压保护等，这些都是构成异步电动机自动控制的最基本环节。

三相异步电动机的继电器——接触器控制由主电路和控制电路两部分组成。阅读主电路时要了解有几台电动机，各有什么特点，了解其启动方法，有否正、反转等，为阅读控制电路提供依据。阅读控制电路时，应从控制主电路的接触器线圈着手，由上而下地对每一个电路进行跟踪分析。遇上分析复杂控制电路时，先分析各个基本环节，然后找出它们之间的联系，以掌握整个电路的控制原理。

7．单相异步电动机的单相绕组通入单相正弦交流电流产生脉动磁场，脉动磁场本身没有启动转矩，故单相异步电动机的关键是解决启动转矩，常用的启动方法有电容分相法和罩极法启动。

分相式单相异电动机实质是两相绕组通以两相电流产生旋转磁场，与其说它是单相异步电动机倒不如说是两相单相异步电动机，只不过它的电流取自于单相电源，由此而得名。分相式单相异步电动机是靠启动回路的阻抗参数进行分相的。

对电容分相式单相异步电动机，在要求改变旋转方向时，一般的方法是：将主绕组（或者副绕组）的两出线端对调，就会改变旋转磁场的转向，从而使电动机的转向得到改变。

单相异步电动机的调速方法有变极调速、降压调速（又分为串联电抗器、串联电容器、自耦变压器和串联晶闸管调压调速方法）、抽头调速等。电风扇用单相异步电动机调速方法目前常用串电抗器法和抽头调速法。

习　　题

6.1　一台三相六极异步电动机，接电源频率 50Hz。试问：它的旋转磁场在定子电流的一

个周期内转过多少空间角度？同步转速是多少？若满载时转子转速为 950r/min，空载时转子转速为 997r/min。试求额定转差率 s_N 和空载转差率 s_0。

6.2　三相异步电动机的额定转速为 1410r/min，电源频率为 50Hz，试求额定转差率和磁极对数。

6.3 电源频率为 50Hz，当三相四极鼠笼式异步电动机的负载由零值增加到额定值时，转差率由 0.5%变到 4%，试求其转速变动范围。

6.4　一台异步电动机定子绕组的额定电压为 380V，电源线电压为 380V，问能否采用 Y-△换接降压启动？为什么？若能采用 Y-△换接降压启动，启动电流和启动转矩与直接（全压）启动时的相比较有何改变？当负载为额定值的一半及三分之一时，可否在 Y 形连接下启动？（假设 T_{st} / T_N=1.4）

6.5　Y-200L-4 异步电动机的启动转矩与额定转矩比值为 T_{st} / T_N=1.9，试问在电压降低 30%（即电压为额定电压的 70%）、负载阻转矩为额定值的 80%的重载情况下，能否启动？为什么？满载时能否启动？为什么？

6.6　在鼠笼式异步电动机的变频调速中，设在标准频率 f_1=50Hz 时，电源电压为 U_1=380V；今将电源频率调到 f_1'=40Hz，若要保持工作磁通 Φ不变，电源电压相应地该调到多少？

6.7　由电机产品目录查得一台 Y160L-6 型三相异步电动机的数据如下表所示。

额定功率/kW	额定电压/V	满　载　时			启动电流/额定电流	启动转矩/额定转矩	最大转矩/额定转矩
		转速/r/min	效率/%	功率因数			
11	380	970	87	0.78	6.5	2.0	2.0

求：同步转速、额定转差率、额定电流、额定转矩、额定输入功率、最大转矩、启动转矩和启动电流。

6.8　接上题，（1）求用 Y-△换接启动时的启动电流和启动转矩；（2）当负载为额定转矩的 50%和 70%时，电动机能否启动？

6.9　接 6.7 题，如采用自耦变压器降压启动，而使电动机转矩为额定转矩的 80%，试求：（1）自耦变压器的变比 k；（2）电动机启动电流和电源供给的启动电流。

6.10　三相异步电动机在转速为 975r/min 时，测得其输出功率为 30kW，试求其转矩。若此时效率为 0.85，功率因数 cosφ=0.82，定子绕组为星形连接，电路线电压为 380V，试求输入的电功率及线电流。

6.11　图 6-53 中哪些能实现点动控制．哪些不能？为什么?

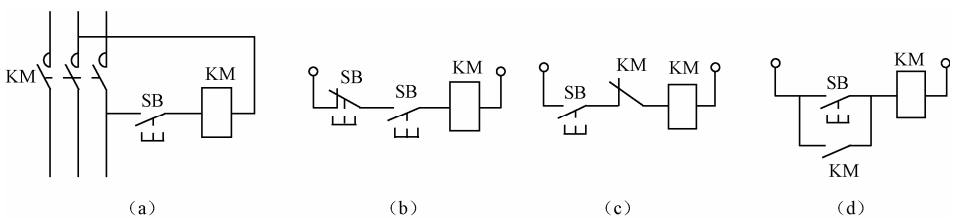


图 6-53

6.12　判断图 6-54 所示各控制电路是否正确？为什么？对不正确的进行改正。

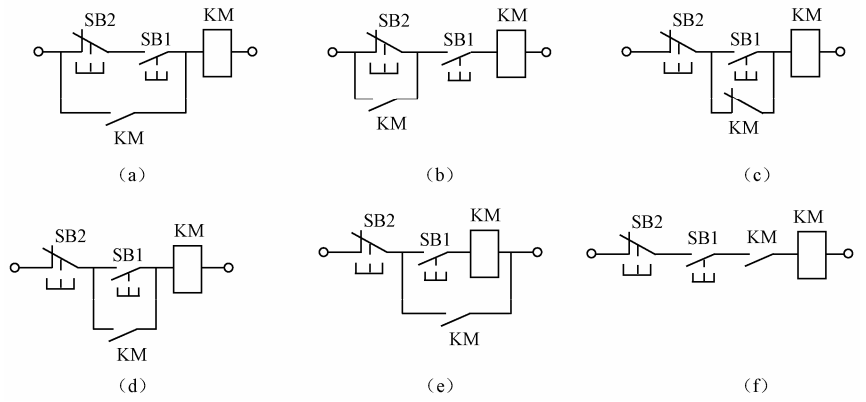


图 6-54

6.13　指出图 6-56 图所示的正、反转控制电路的错误之处，并予以改正。

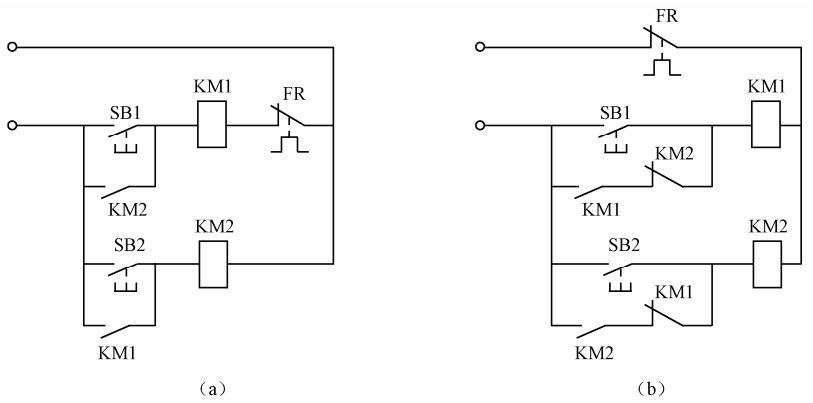


图 6-55

6.14　试画出既能连续工作，又能点动工作的三相异步电动机的控制电路。

6.15　有两台三相异步电动机 M1、M2，控制要求：（1）M1 启动后 M2 才能启动（即必须在 M1 启动，按下 M2 的启动按钮才能使 M2 启动）；（2）M2 停转后 M1 才能停转（即必须要在 M2 停转后，按下 M1 的停止按钮才能使 M1 停转）。试画出继电器-接触器控制电路图，该电路应具有短路、过载和欠压保护的功能。

参 考 文 献

［1］ 薛涛. 电工技术. 北京：机械工业出版社，2002.8

［2］ 季顺宁.电工电路测试与设计. 北京：机械工业出版社，2008.9

［3］ 孙晓华.新编电工技术项目教程. 北京：电子工业出版社，2007.8

［4］ 刘涛. 电工技能训练. 北京：电子工业出版社，2002.6

［5］ 田丽洁. 电路分析基础. 北京：电子工业出版社，2010.9

［6］ 刘涛. 电工技能训练. 北京：电子工业出版社，2002.6

［7］ 刘文革.实用电工电子技术基础. 第 1 版. 北京：中国铁道出版社，2010.9

［8］ 徐国和.电工学与工业电子学. 第 5 版. 北京：高等教育出版社，1993.5

［9］ 程周. 电工与电子技术. 北京：高等教育出版社，2001.7

［10］ 周绍平，李严.电工与电子技术. 北京：北京交通大学出版社，2007.7

［11］ 熊幸明.电工电子技能训练. 北京：电子工业出版社，2004.1

［12］ 徐建俊.电机与电气控制项目教程. 北京：机械工业出版社，2008.9

［13］ 孔繁瑞，邵林.电工技术综合实训. 北京：北京师范大学出版社，2005.8

［14］ 杜贵明，张森林. 电机与电气控制［M］. 武汉：华中科技大学出版社，2010.5

［15］ 谭维瑜. 电机与电气控制［M］. 北京：机械工业出版社，2009.9

［16］ 李明. 电机与电力拖动［M］. 北京：电子工业出版社，2006.8

［17］ 祁和义，王建. 维修电工实训与技能考核训练教程［M］. 北京：机械工业出版社，2008.1

［18］ 白乃平.电工基础. 西安：西安电子科技大学出版社，2002